

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra telekomunikační techniky**

**Plochá magnetická smyčková anténa**

**Flat Magnetic Loop Antenna**

**2014**

**Bc. Vojtěch Komárek**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Vojtěch Komárek**

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Plochá magnetická smyčková anténa  
Flat Magnetic Loop Antenna

Zásady pro vypracování:

Magnetická smyčková anténa je specifický typ antény. Práce si klade za cíl rozbor funkce tzv. ploché magnetické smyčkové antény a rozbor jejich vlastností.

Vypracování práce bude splňovat následující body zadání:

1. Popište základní princip funkce MLA antény.
2. Ověřte vliv šířky hlavní smyčky antény na její vlastnosti.
3. Ověřte vliv umístění vazební smyčky na vlastnosti antény.
4. Prověřte závěry z bodu 2 a 3 měřením.

Seznam doporučené odborné literatury:

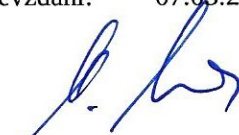
BALANIS, Constantine. *Antenna Theory : Analysis and design*. 3rd edition. United States : Wiley, 2005. 1117 s. ISBN 0-471-66782-X.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Dvorský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: *1. 3. 2014*



.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval *Ing. Marku Dvorskému, Ph.D.* za odbornou pomoc a konzultace při vytváření této diplomové práce.



## **Abstrakt**

Diplomová práce je zaměřená na téma plochá magnetická smyčková anténa. Definuje pojmy, zásady a chování magnetických smyčkových antén. V úvodu jsou popsány základní části magnetické smyčkové antény včetně jejich parametrů. Následující kapitola je věnována ploché magnetické smyčkové anténě. Největší část práce je zaměřena na praktické ověření funkce ploché magnetické smyčkové antény. V práci jsou zakomponovány praktické poznatky vyplývající z testování ploché magnetické smyčkové antény. Práce je rozdělena do čtyř kapitol, přičemž stěžejní částí je podkapitola 2.3 věnující se praktickému ověření funkce ploché magnetické smyčkové antény.

## **Klíčová slova**

Hlavní smyčka, MLA, plochá magnetická smyčková anténa, PSV, SWR, vazební smyčka, vyzařovací diagram

## **Abstract**

The thesis is focused on the theme of flat magnetic loop antenna. Thesis also defines the terms, principles and behavior of the magnetic loop antennas. Preface describes the fundamental parts of magnetic loop antennas, including their parameters. Next, the second chapter is devoted to a flat magnetic loop antenna. The largest part of the work is focused on the practical verification of the function of flat magnetic loop antenna. Diploma work incorporated the practical knowledge stemming from testing of flat magnetic loop antenna. The entire work is divided into four chapters, whereas the crucial part is the subchapter 2.3, which deals with the practical verification of the function of flat magnetic loop antenna.

## **Key words**

Main loop, MLA, flat magnetic loop antenna, SWR, coupling loop, radiation pattern

## Seznam použitých zkratek

$\eta$	účinnost	[%]
$\lambda$	vlnová délka	[m]
$\rho$	měrný odpor	[ $\Omega \cdot \text{m}^3$ ]
$\phi$	indukční tok	[Wb]
$ Z $	absolutní hodnota impedance	[ $\Omega$ ]
$\mu_0$	permeabilita vakua	[ $\text{Hm}^{-1}$ ]
$\mu_R$	relativní permeabilita	[-]
A	plocha hlavní smyčky	[ $\text{m}^2$ ]
B	šířka pásma	[Hz]
C	kapacita kondenzátoru	[F]
c	rychlost světla	[ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
CB	občanské pásmo ( <i>Citizen Band</i> )	[-]
$C_{\text{LOOP}}$	kapacita smyčky	[F]
$C_{\text{REZ}}$	rezonanční kapacita	[F]
ČSV	činitel stojatých vln	[-]
D	průměr hlavní smyčky	[m]
d	průměr vodiče hlavní smyčky	[m]
$d_1$	průměr vazební smyčky	[m]
E	intenzita elektrického pole	[ $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ]
f	frekvence	[Hz]
$f_0$	pracovní kmitočet	[Hz]
H	intenzita magnetického pole	[ $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ ]
L	indukčnost cívky	[H]
MLA	magnetická smyčková anténa ( <i>magnetic loop antenna</i> )	[-]
N	počet závitů	[-]
NF	nízkofrekvenční	[-]
P	výkon	[W]
PSV	činitel stojatých vln	[-]
Q	jakost cívky	[-]
R	odpor	[ $\Omega$ ]

$r$	poloměr	[m]
$R_A$	vyzařovací odpor	[ $\Omega$ ]
$R_P$	odpor blízko náležících vodičů	[ $\Omega$ ]
$R_Z$	ztrátový odpor	[ $\Omega$ ]
$S$	plocha	[m <sup>2</sup> ]
$S_{11}$	rozptylový parametr	[dB]
$U$	obvod hlavní smyčky	[m]
$u$	obvod vazební smyčky	[m]
$U_C$	napětí na deskách kondenzátoru	[V]
$VF$	vysokofrekvenční	[-]
$X_L$	indukčnost cívky	[ $\Omega$ ]
$Z$	impedance	[ $\Omega$ ]

# Obsah

Úvod.....	1
1 Základní popis magnetické smyčkové antény.....	2
1.1 Základní části antény.....	2
1.1.1 Hlavní smyčka.....	3
1.1.2 Vazební smyčka.....	4
1.1.3 Ladicí kondenzátor.....	6
1.2 Elektrické parametry magnetické smyčkové antény.....	8
1.2.1 Anténní impedance a indukčnost.....	9
1.2.2 Cirkulační proudy v magnetické smyčkové anténě.....	10
1.2.3 Rezonanční kmitočet, šířka pásma.....	11
1.2.4 Účinnost magnetické smyčkové antény.....	11
1.2.5 Vyzářený výkon.....	13
1.2.6 Zisk antény.....	13
2 Plochá magnetická smyčková anténa.....	15
2.1 Matematický aparát pro výpočet magnetické smyčkové antény.....	17
2.1.1 Geometrie magnetické smyčkové antény.....	17
2.1.2 Elektrické vlastnosti magnetické smyčkové antény.....	18
2.2 Simulace – 4NEC2.....	19
2.3 Praktické ověření funkce ploché magnetické smyčkové antény.....	21
2.3.1 Vliv velikosti vazební smyčky.....	24
2.3.2 Umístění budicího obvodu.....	27
2.3.3 Změna kapacity.....	30
2.3.4 Změna šířky válce.....	32
2.4 Závěry plynoucí z analýzy antény.....	35
Závěr.....	41
Použitá literatura.....	XLIII
Seznam příloh.....	XLV

---

# Úvod

Anténa (vysílací) je zařízení, jehož úlohou je přeměnit přivedenou vysokofrekvenční energii z vysílače (generátoru) na elektromagnetické pole, které se ve formě elektromagnetického vlnění vyzařuje do okolního prostoru. Příjemací anténa má reciprokovou funkci – elektromagnetické vlnění z okolního prostoru převádí na vysokofrekvenční energii a ta je dále zpracovávána v elektrických obvodech přijímače [1]. Interakce vysílací a přijímací antény vytváří systém, který umožňuje tzv. bezdrátový přenos informací. Z výše uvedeného textu je pojem vysílací anténa a přijímací anténa zřejmý. V praxi se oba typy antén sdružují často do antény jediné, která funguje pro vysílání i pro příjem. Kvalitní vysílací anténa je zpravidla i dobrou anténou přijímací. Obráceně to pravda vždy není – je potřeba si tuhle zásadu uvědomit. V praxi se nezdá setkávat s používáním oddělených antén pro vysílání i příjem. Netýká se to jen profesionálních služeb, radioamatéři používají oddělené antény pro vysílání a příjem velmi často. Antény jsou obecně rozděleny na několik základních kategorií podle jejich fyzikálního principu. Tyto se pak dělí na mnoho desítek konstrukčních podtypů.

Tato diplomová práce je zaměřena na specifické téma - magnetickou smyčkovou anténu (*MLA*). Jedním z možných konstrukčních řešení smyčkové antény je řešení popsané v této práci, kdy není jako vodič smyčky použita tenkostěnná trubka, ale plochý vodič s extrémním poměrem šířky a výšky. I tento typ **ploché smyčkové antény** vychází z obecného konceptu magnetické smyčkové antény, zásadní odlišnost je ve tvaru použitého vodiče. V diplomové práci jsou vysvětleny obecné anténní parametry, jejich matematické vztahy, včetně popisu praktického sestrojení antény. Na sestrojení „prototypu“ antény bylo provedeno několik testů a měření. Poznatky a výsledky z praktického testování antény byly zapracovány do této diplomové práce.

První kapitola je věnována základnímu popisu magnetické smyčkové antény. Tato kapitola pojednává o základních částech antény, jako je hlavní smyčka, vazební smyčka a ladicí kondenzátor. Dále jsou zde popsány základní parametry magnetické smyčkové antény, mezi které patří anténní impedance, účinnost, vysílací výkon, zisk antény, atd.

Druhá kapitola se již věnuje hlavnímu tématu - **ploché magnetické smyčkové anténě**. V této kapitole jsou také zmíněny některé matematické vzorce a výpočty, které jsou potřebné k sestavení antény.

Jádro práce spočívá v kapitole číslo dvě, která se zabývá mimo jiné také praktickým měřením. V této kapitole je nejen sestrojena a proměřena plochá magnetická smyčková anténa, ale jsou zde zmíněny rozdílnosti v chování antény v interakci s menší nebo větší vazební smyčkou, změnou dielektrika a polohou vazební smyčky k hlavní smyčce MLA. Je vysvětleno, jaký vliv má umístění budicího obvodu na celkové parametry antény, experimenty je nalezen optimální rozměr antény vzhledem k šířce pásma.

---

# 1 Základní popis magnetické smyčkové antény

Jednoduchým, levným a poměrně univerzálním typem antén jsou tzv. smyčkové antény. Smyčka antény může mít mnoho různých podob, nejběžnější je klasický kruh. Výjimkou není ani obdélníkový, čtvercový, trojúhelníkový, ani například elipsovitý tvar. Samozřejmě je možné si vytvořit i mnoho dalších tvarů této antény, včetně antény s několika závity. Vzhledem k jednoduchosti konstrukce je nejvíce populární právě anténa s kruhovou smyčkou.

Je dokázáno, že malá kruhová smyčka je stejná jako nekonečný magnetický dipól, jehož osa je kolmá na rovinu smyčky. To znamená, že elektrické pole vyzařované malou kruhovou smyčkou má stejný matematický popis jako nekonečně vyzařující magnetický dipól. Smyčkové antény se obvykle rozdělují do dvou kategorií a to na elektricky malé (jejichž obvod je obvykle menší než jedna desetina vlnové délky) a na elektricky velké (které se využívají v pásmech od 3 - 3.000 MHz) [2].

Cílem této diplomové práce je popis a měření ploché magnetické smyčkové antény, proto tato kapitola nebude věnována všeobecnému popisu antén, ale bude zaměřena přímo na magnetické smyčkové antény a zejména na její variantu, která je v této práci pojmenována jako **plochá magnetická smyčková anténa**.

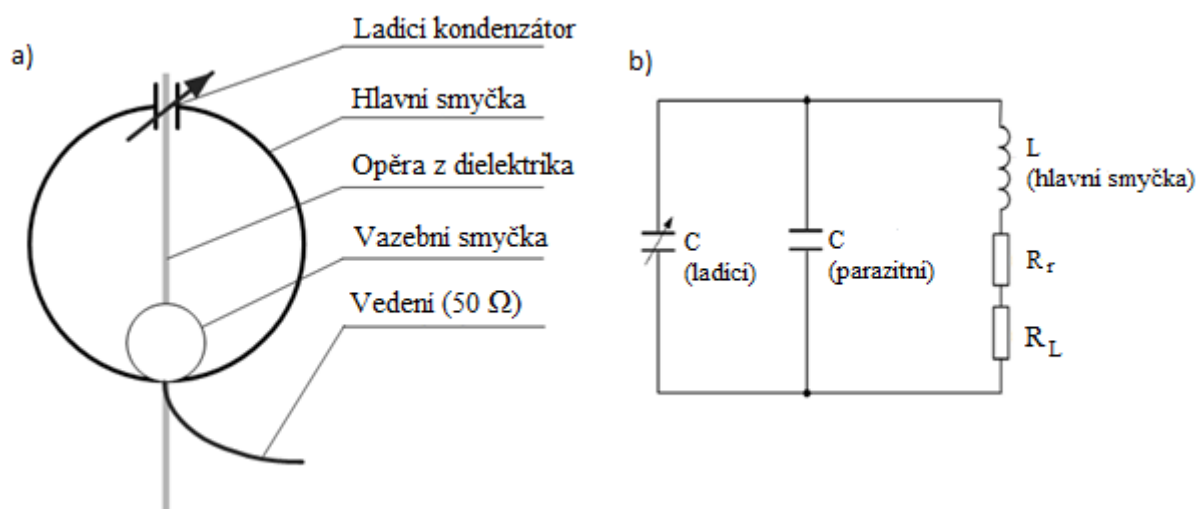
## 1.1 Základní části antény

Magnetická smyčková anténa [3] vychází z klasické rámové antény. Hlavní výhoda MLA v porovnání s dipólem spočívá především v její rozměrové efektivnosti. Ačkoliv některé anténní parametry jsou závislé i na tvaru, faktem zůstává, že při porovnání poměrné velikosti  $d/\lambda$  je rozměr MLA  $n$ -násobně menší než dipól. Pokud například srovnáme magnetickou smyčkovou anténu s klasickým půlvlnným dipólem, zjistíme, že délka smyčky je zhruba 5x až 10x kratší a její průměr je pouze cca 3 % vlnové délky.

Smyčková anténa je, jak již bylo zmíněno výše, výhodná právě kvůli svým rozměrům. V oblasti krátkých vln, kdy je vlnová délka 10 - 100 m, by byla konstrukce jiného typu antény mnohem náročnější na zástavbový prostor, někdy až nerealizovatelná. V případech, kdy potřebujeme řešit anténu pro vnitřní prostory, je možné MLA díky jejímu malému rozměru využít i pro dlouhé vlny. V takovémto případě se cívka antény řeší větším počtem závitů. Jejich počet se řídí kmitočtem, velikostí smyčky a hodnotou ladícího kondenzátoru [4].

Na rozdíl od klasické rámové antény, kde obvod antény odpovídá zhruba vlnové délce  $\lambda$  (označuje vzdálenost dvou nejbližších bodů vlnění, které kmitají ve fázi), využívá magnetická smyčková anténa obvod okolo  $0,2 \lambda$  (v praxi až  $0,1 \lambda$ ), což je velice výhodné. Menší rozměr MLA proti jiným anténám není její jedinou výhodou. Další výhodou je, že magnetická smyčková anténa sice generuje i  $E$  (intenzita elektrického pole), ale podstatně menších hodnot. Dále zpracovává magnetickou složku  $H$  elektromagnetického pole, tzn., že je více méně imunní vůči elektrickému rušení [5].

Každou anténu lze rozložit do několika základních bloků. V případě MLA se jedná o tři základní bloky, kterými je hlavní smyčka, ladící kondenzátor a vazební smyčka [3].



Obrázek 1.1: a) konstrukční schéma, b) náhradní obvod MLA

### 1.1.1 Hlavní smyčka

Obvod hlavní smyčky magnetické antény je odvozen z vlnové délky  $\lambda$  (v praxi se většinou setkáme s parametrem  $0,1 - 0,2 \lambda$ ) [3, 6]. Hlavní smyčka se v praxi i v teoretické fyzice většinou realizuje jediným závitem, který je realizován většinou koaxiálním kabelem nebo tenkostěnnou trubkou. Tato „jedno závitová cívka“ představuje paralelní rezonanční obvod. V tomto LC obvodu mizí při rezonanci jalová složka impedance a proud tekoucí tímto obvodem vytváří v okolí cívky velmi silné magnetické pole. Vyzařovací odpor antény ( $R_A$ ) je typicky velmi nízký, řádově v desetinách ohmů. Ztrátový odpor antény ( $R_Z$ ) nebývá velký, ale v poměru k malému vyzařovacímu odporu antény není nezanedbatelný.

Účinnost antény je obecně vyjádřena poměrem vyzařovacího odporu ke ztrátovému odporu antény, z čehož vyplývá, že funkčnost takovéto antény bude záviset hlavně na jejím konstrukčním řešení [5, 6]. Právě kvůli zmenšení ztrátového odporu antény je smyčka většinou tvořena z co nejlépe vodivého vodiče o velkém průměru. Díky tomu, že zde dochází ke „skinefektu“ (povrchovému jevu) [7], tak nemusíme využívat drahých vodičů s plným průřezem, ale stačí nám využít tenkostěnné trubky. Jako ideální materiál se doporučuje využít měděnou trubku s povrchovou úpravou tvořenou stříbrem, není vhodné využívat materiál jako je hliník nebo železo.

Poměr odporu při průchodu střídavého proudu a odporu při průchodu stejnosměrného proudu vodičem je součinitel zvětšení odporu [7]:

$$R = \left( 0,5 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{\mu_r \cdot f}{\rho}} + 0,2 \right) \cdot r \text{ [}\Omega\text{]} \quad (1.1)$$

Kde:  $R$  ... odpor vodiče při průchodu střídavého proudu [ $\Omega$ ]

$r$  ... odpor vodiče při průchodu stejnosměrného proudu [ $\Omega$ ]

$d$  ... průměr vodiče hlavní smyčky [mm]



$\mu_r$  ... relativní permeabilita materiálu vodiče

$f$  ... frekvence [Hz]

$\rho$  ... měrný odpor vodiče hlavní smyčky [ $\Omega \cdot \text{cm}^3$ ]

Indukčnost jednoho závitů vzduchové cívky můžeme spočítat podle vztahu [3]:

$$L = 0,2 \cdot U \cdot \left( \ln \frac{U}{d} - 1,07 \right) [\mu\text{H}] \quad (1.2)$$

Kde:  $L$  ... indukčnost smyčky [ $\mu\text{H}$ ]

$U$  ... obvod hlavní smyčky [m]

$d$  ... průměr vodiče hlavní smyčky [mm]

V případě, že chceme navrhnout anténu pro velké vlnové délky (jako jsou dlouhé a střední vlny), většinou využijeme víc než jeden závit hlavní smyčky. V opačném případě by MLA dosahovala nevhodně velkých rozměrů. Samozřejmě nesmíme změnit charakter MLA na rámovou anténu. Vždy musí platit pravidlo, že vlnová délka bude v rozmezí  $0,1 - 0,2 \lambda$  [3, 6]. Indukčnost v tomto případě roste počtem závitů na druhou.

$$L' = L \cdot N^2 [\mu\text{H}] \quad (1.3)$$

Kde:  $L'$  ... indukčnosti více závitové smyčky [ $\mu\text{H}$ ]

$L$  ... indukčnost jednoho závitů [ $\mu\text{H}$ ]

Plochu hlavní smyčky vypočteme ze vztahu:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} [\text{m}^2] \quad (1.4)$$

Kde:  $D$  ... průměr hlavní smyčky [m]

### 1.1.2 Vazební smyčka

Vazební smyčkou je v tomto případě pouze jinak nazván budící obvod. Je tvořen menší smyčkou, která je umístěna uvnitř hlavní smyčky, naproti ladicímu kondenzátoru. Je velice důležité, aby v celém anténním systému byla dodržena stejná impedance. Toto se realizuje hlavně pomocí vazebních smyček. Připojením napáječe k anténě se stává vstupní rezistence antény zatěžovacím odporem napájecího vedení a z toho vyplývá požadavek na přizpůsobení. Je nutné, aby platila rovnost impedance napáječe a vstupní impedance antény. Dokonalé přizpůsobení se projeví přímo na svorkách zdroje, kdy se změnou délky vedení nezmění zatěžovací odpor [4]. V opačném případě by docházelo k ovlivňování zatěžovacího odporu a tím i ke ztrátám v koaxiálním vedení.

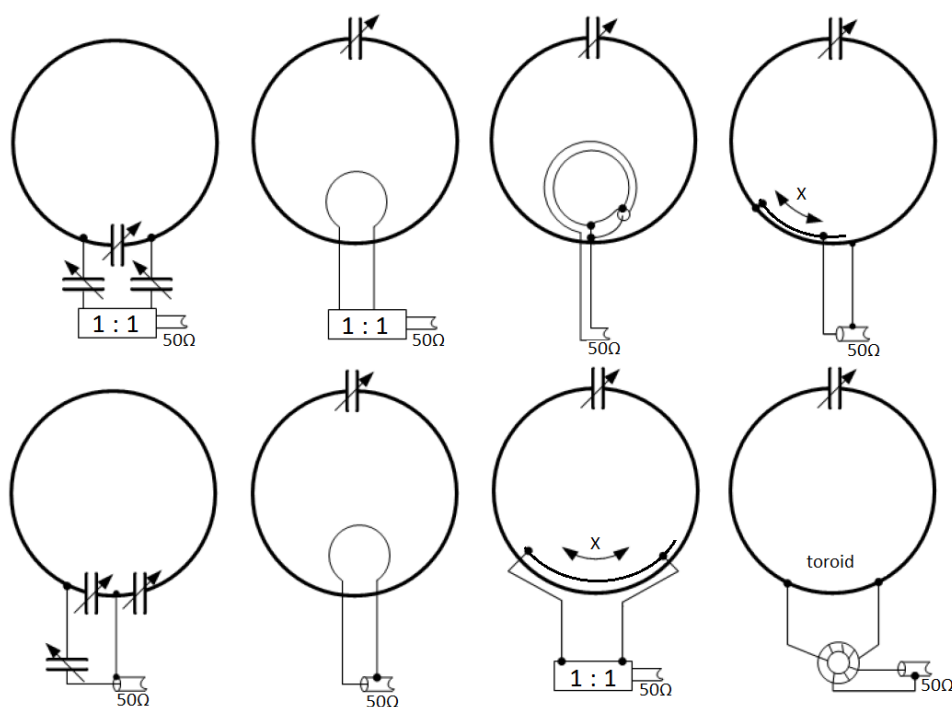
Téměř vždy se využívá pravidlo, že průměr vazební smyčky je:

$$d_1 = \frac{D}{5} \text{ [m]} \quad (1.5)$$

Kde:  $d_1$  ... průměr vazební smyčky [m]

$D$  ... průměr hlavní smyčky [m]

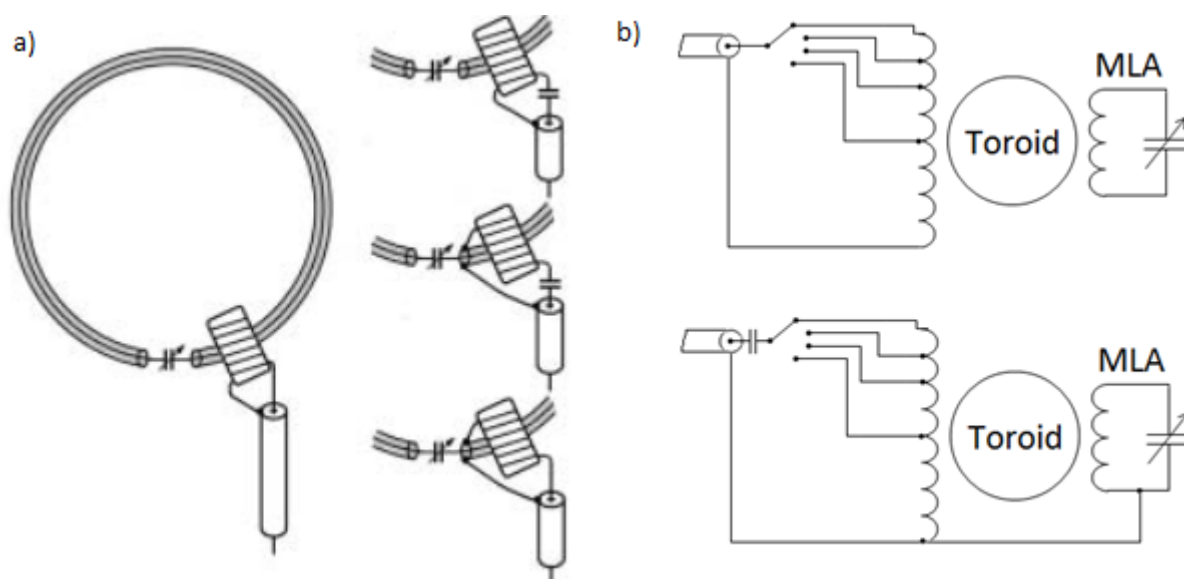
Doporučená vzdálenost mezi hlavní a vazební smyčkou je 0 - 5 cm. Tato vzdálenost společně s přesným doladěním kondenzátoru na rezonanční kmitočet určuje pracovní kmitočet  $f_0$ , hodnotu činitele jakosti  $Q$  a zároveň ovlivňuje výslednou hodnotu PSV (*poměr stojatých vln*) [4]. V praxi se používá několik způsobů jak navázat vazební smyčku na vedení s charakteristickou impedancí  $50 \Omega$  (viz obrázek 1.2).



Obrázek 1.2: Typy budících obvodů [8]

Další možnost je zajímavá tím, že zjednodušuje konstrukci magnetické smyčkové antény i její širokopásmové impedanční přizpůsobení. Princip spočívá v buzení anténní smyčky toroidním proudovým transformátorem. Výhodou je značná širokopásmovost budicího obvodu a dále se z hlediska praxe jeví jako výhodné, že doladovací kondenzátor i budicí element jsou konstrukčně malé součástky a lze je uzavřít do malé krabičky, která je umístěna nejlépe na spodním konci anténní smyčky (úvaha, že toroid je nutné umístit na střed smyčky, se ukázala jako nedůvodná. Umístění nijak neovlivňovalo anténní parametry [9]). Další výhoda tohoto řešení spočívá v tom, že do cesty přenosu

energie z napájecího vedení do obvodu magnetické antény nevstupují přechodové odpory, které mohou ovlivnit účinnost antény.



Obrázek 1.3: a) Příklady uspořádání budícího obvodu [9], b) princip buzení pomocí toroidu

Pro ideální funkčnost antény je vhodné zvolit správný typ toroidu, protože rozdíly v technologii výroby toroidních jader mají vliv na širokopásmové přizpůsobení a ztráty.

### 1.1.3 Ladící kondenzátor

Ladící (přesněji doladovací) kondenzátor umožňuje v relativně velké míře měnit pracovní kmitočet MLA. Není problém dosáhnout přeladitelnosti 1:4. Míra přeladitelnosti je dána délkou hlavní smyčky  $U$  a samotnou hodnotou kondenzátoru. Pokud chceme využívat magnetickou smyčkovou anténu pro příjem, stačí nám klasický laditelný kondenzátor (např. z DV/SV přijímače) nebo varicap [8]. V případě, že se MLA používá jako vysílač, je nutné myslet na to, že smyčka představuje otevřený závit na prázdno, tudíž se na koncích smyčky vyskytuje vysoké napětí.



Obrázek 1.4: Segmentový ladící kondenzátor

Z tohoto důvodu je kladen vysoký důraz na použité dielektrikum, respektive na elektrickou pevnost vzduchové mezery mezi elektrodami použitého kondenzátoru. Je nutno také upozornit na negativní vliv třecích kontaktů, které se u těchto typů kondenzátorů používají. Tento problém se dá vyřešit použitím ladicího kondenzátoru o více sekcích, který má rotor (otočné segmenty) vodivě spojen. Jako připojovací body pak slouží statorové části kondenzátoru [5, 8]. Odpovídající hodnotu kondenzátoru lze vypočítat z Thomsonova vztahu:

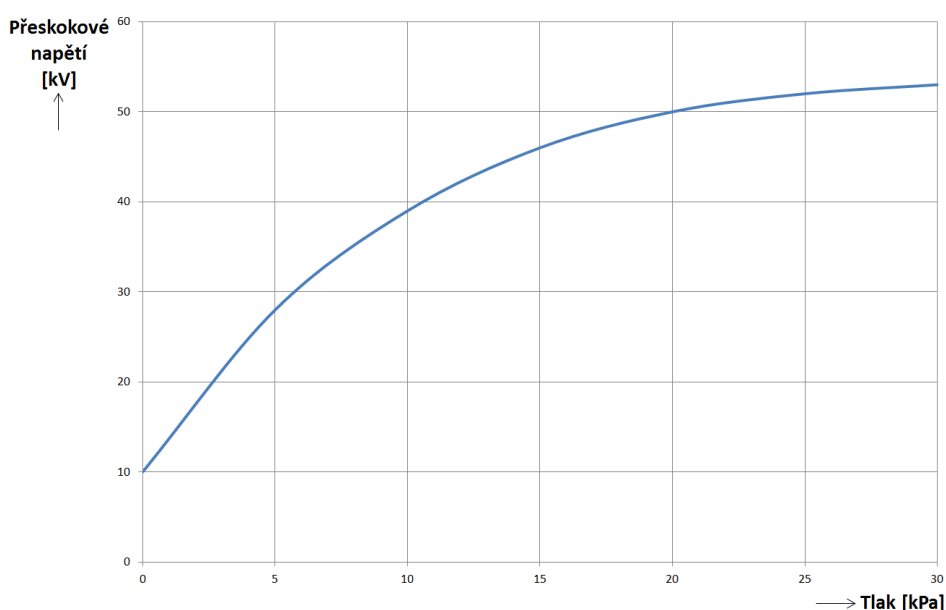
$$C = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_0)^2 \cdot L} [F] \quad (1.6)$$

Při konstrukci magnetické smyčkové antény se využívají nejčastěji vzduchové kondenzátory. Vzduchový kondenzátor se skládá ze dvou soustav desek pevně zachycených na izolačních částech tak, že desky jedné soustavy zapadají do mezer druhé soustavy, aniž by se dotýkaly jiných desek a tím mění kapacitu kondenzátoru.

V kondenzátorech pro antény se vzduchová mezera mezi deskami řídí podle napětí, na které je kondenzátor navržen. Z opatrnosti je třeba se vyhnout takovým bodům, ve kterých by se mohl nežádoucně soustředit silový tok elektrického pole a způsobit dokonce slabou korunu (elektrický výboj) při pracovním napětí [7].

Dále mají mít pevné izolanty malé ztráty a mají být uspořádány tak, aby na nich byl malý potenciální rozdíl. Elektrická pevnost vzduchu při vysokých kmitočtech je poněkud menší než při 50 Hz. Mimo to, slabé známky sršení, které nemají při 50 Hz následky, způsobí při vysokých kmitočtech velkou ionizaci doprovázenou značnými ztrátami výkonu nebo dokonce výbojem. Použití vzduchu jako dielektrika v kondenzátorech na vysoké napětí vyžaduje velké mezery mezi deskami a pečlivé zaoblení všech ostrých krajů, aby bylo možné vyhnout se soustředění pole. Konečná úprava desek má být velice pečlivá, povrch se má leštit, kraje zaoblit a tloušťka desek má být 1/3 až 1/4 velikosti vzduchové mezery.

Napětí, přípustné u vzduchových kondenzátorů, může být zvětšeno zvýšením tlaku vzduchu, protože vztah mezi přeskokovým napětím a tlakem má při vysokých kmitočtech průběh znázorněný na obrázku 1.5. Existují průmyslově vyráběné kondenzátory jak s pevnou, tak i proměnnou kapacitou. V prakticky provedených kondenzátorech se stlačeným plynem se používá k udržení tlaku suchého dusíku, díky tomu se zvýší přípustné napětí 4 až 5 krát na rozdíl od napětí při normálním atmosférickém tlaku. Další možností, jak zvýšit přípustné napětí, je vložení kondenzátoru do vakua. Za těchto podmínek je v kondenzátoru tak málo plynu, že ionizace není skoro možná a elektrická pevnost se značně zvyšuje.

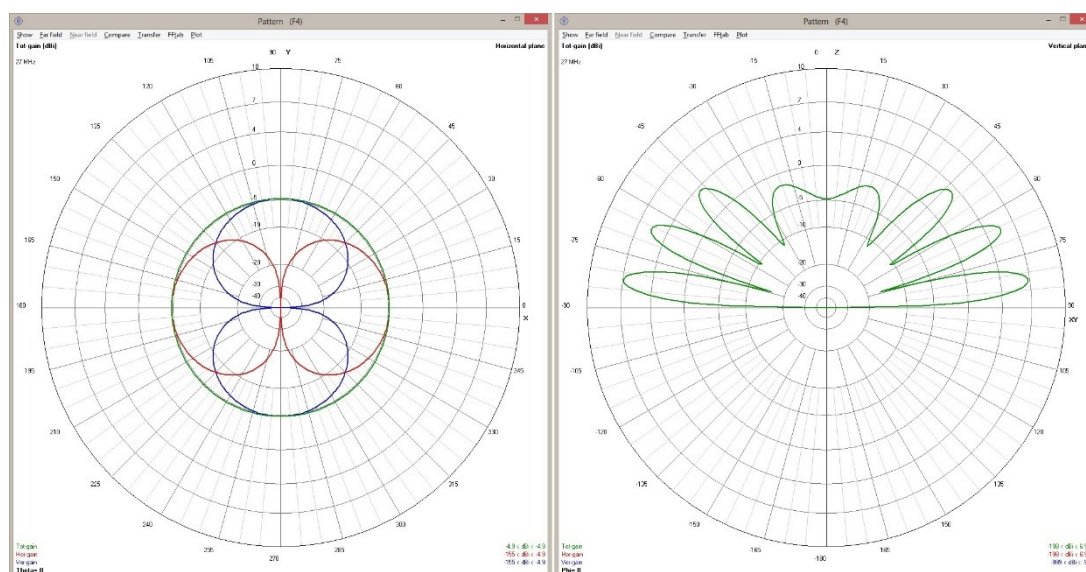


Obrázek 1.5: Přeskokové napětí v závislosti na tlaku [7]

## 1.2 Elektrické parametry magnetické smyčkové antény

Je nutné podotknout, že pokud je řešeno napájení MLA z jiného než koaxiálního napaječe, tak dochází ke ztrátě směrovosti. Rozhodujícím faktorem udávajícím selektivitu v rezonanci je činitel jakosti obvodu LC  $Q$ , jehož hodnota může dosahovat až  $Q = 2500$ . Pokud je smyčka zatížena při vysílání vyzařovacím odporem, pak klesající  $Q$  zapříčiní snížení selektivity [3].

Magnetická smyčková anténa se vyznačuje směrovostí s vyzařovacím diagramem ve tvaru číslice osm. Takováto vyzařovací charakteristika se vyznačuje tím, že umožňuje maximální příjem v předním a zadním směru, zatímco v bočních směrech je tento příjem velice potlačen (s prakticky potvrzenou předo-boční citlivostí až -25 dB) [8].



Obrázek 1.6: Příklad horizont. (vlevo) a vertik. (vpravo) vyzařovacího diagramu MLA

Při modelování magnetické smyčkové antény v simulačním programu 4NEC2 se ukazuje, že dosažitelné zisky u magnetických antén kolísají cca od  $-1,5 \div 3,5$  dB (vertikální polarizace) a  $-8 \div 5,5$  dB (horizontální polarizace) vztaženo k izotropnímu zářiči [3].

V závěru tohoto bodu uvedme, že se používají dva základní typy provedení hlavní smyčky antény. Jedná se o použití buď měděné trubky, nebo koaxiálního kabelu. Konstrukčně se tato provedení nijak výrazně neliší, ale ve funkčnosti nám přináší spoustu rozdílů [4].

Měděná trubka je velice rozšířený materiál, používá se hlavně díky malému ohmickému odporu. Nevýhoda této konstrukce je v tom, že takováto anténa nemá potlačenou složku elektrického pole pomocí elektrostatického stínění. Tento fakt má za následek, že anténa přijímá z okolí i část elektromagnetického pole, což většinou vede k nežádoucímu jevu, například rušení antény.

Tento problém lze vyřešit nahrazením měděné trubky koaxiálním kabelem. Použití koaxiálního kabelu vede k výraznému potlačení elektrické složky elektromagnetického pole. Tento typ antény je vhodný pro použití v oblastech s vysokým rušením. Nutno dodat, že při použití koaxiálního kabelu jako hlavní smyčky antény je nutné, aby anténa měla ve své polovině závitů přerušené stínění, protože jinak by se anténu nepodařilo dostat do rezonance.

V podkapitolách níže budou popsány hlavní elektrické parametry magnetické smyčkové antény včetně vzorců. Nutno podotknout, že některé vzorce byly zmíněny v přechozí kapitole, proto se zde nebudou znovu vyskytovat.

### 1.2.1 Anténní impedance a indukčnost

Vlastní impedance antény je veličina důležitá pro přenos maxima energie mezi vysílačem a anténou za předpokladu, že vysílač je přímo připojen k anténě. V praxi je jen zřídka možné připojit anténu přímo k vysílači. Obvykle je anténa umístěna venku na stožáru nebo na střeše, na rozdíl od vysílače, který je většinou umístěn jinde. V takovém případě řadíme mezi vysílač a anténu tzv. vysokofrekvenční napáječ [1].

Vstupní impedance se uvažuje v místě připojení antény k napáječi. Charakter impedance (kapacitní nebo induktivní) a velikost její složky (reálná a imaginární) se řídí vlnovou délkou a rozměry antény. Součástí reálné složky je vyzařovací odpor (odpor záření)  $R_z$ , jehož velikost odpovídá vyzařovanému výkonu z antény a efektivnímu proudu, tekoucím anténou.

Vstupní impedance antény v přítomnosti jiných antén nebo vodičů je výrazně ovlivněna proudy tekoucími v sousedních vodičích, a to prostřednictvím vzájemné vazby. Tento vliv je nazýván vzájemnou impedancí což znamená, že je-li anténa buzena, bude proud jí protékající indukovat elektromotorickou sílu v libovolné jiné anténě, která je umístěna v blízkosti první antény.

Problematika výpočtu impedancí je složitá záležitost, neboť impedance reálné antény velmi silně závisí na konstrukci antény a zvláště na uspořádání místa napájení, pokud jde o vstupní impedanci. Je možno ji simulačně spočítat v software (MMANA [10], 4NEC2 [11]), ale v praxi se většinou dává přednost zjišťování impedance měřením.

Indukčností se nazývá schopnost elektrických obvodů působit proti změně proudu, který jimi protéká. Toto působení proti změně proudu se projevuje jako opačná elektromotorická síla vznikající při změně proudu.

Mění-li se proud procházející uzavřeným obvodem, tak se také mění indukce magnetického pole  $B$  a také indukční tok  $\phi$ . V obvodu dochází ke změnám indukčního toku a tím zde vzniká indukované elektromotorické napětí. Indukční tok v obvodu je přímo úměrný procházejícímu proudu [4, 5, 12].

$$\phi = L \cdot I \Rightarrow L = \frac{\phi}{I} \quad (1.7)$$

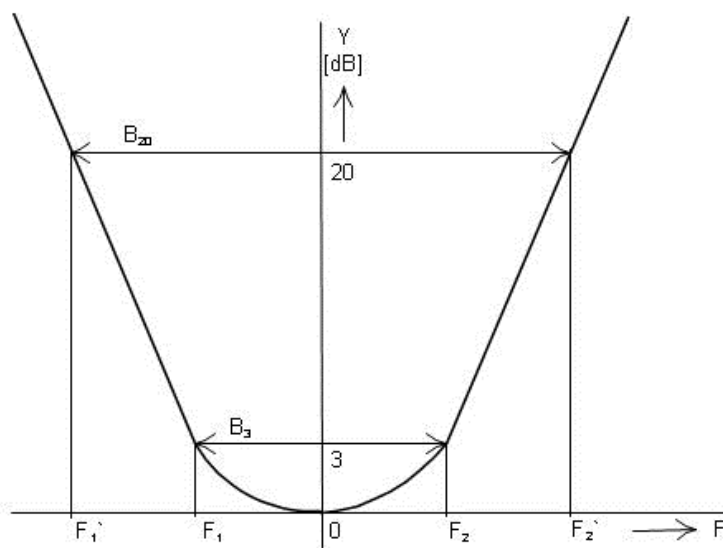
Kde:  $L$  ... vlastní indukčnost obvodu [H]

$\Phi$  ... magnetický indukční tok

Díky skin efektu se většina proudu vyskytuje na povrchu vodiče a z tohoto důvodu můžeme využít vztah pro výpočet indukčnosti jedno závitové smyčky.

### 1.2.2 Cirkulační proudy v magnetické smyčkové anténě

Náhradní schéma magnetické smyčkové antény je paralelní RLC obvod. V tomto obvodu dochází k přechodovým dějům, které jsou doprovázeny cirkulačními proudy. Jak již bylo zmíněno, MLA se vyznačuje vysokým činitelem  $Q$ , který udává selektivitu při rezonanci.



Obrázek 1.7: Rezonanční křivka MLA

Paralelně laděný obvod získáme připojením zdroje napětí k paralelnímu pojení indukčnosti a kapacity. Uvědomme si, že jediným rozdílem mezi sériově a paralelně laděným obvodem je ve způsobu připojení napájecího napětí. V případě splnění podmínek Thomsonova vztahu nastává děj zvaný rezonance. Z rezonanční křivky můžeme určit selektivitu dle vztahu [7]:

$$S = \frac{B_3}{B_{20}} \quad (1.8)$$

Je nutno zmínit, že v obvodu MLA dosahují cirkulační proudy velkých hodnot, proto je nutné na toto myslet při konstrukci antény.

### 1.2.3 Rezonanční kmitočet, šířka pásma

U kmitočtu, při kterém jsou si absolutní hodnoty indukčních a kapacitních odporů vzájemně rovny a který se nazývá kmitočtem rezonančním, je proud v obvodu maximální a ve fázi s přiváděným napětím. Při nižších kmitočtech se proud zmenšuje a předbíhá napětí, při vyšších kmitočtech se zmenšuje a zpožďuje za napětím.

Anténa představuje v podstatě otevřený rezonanční obvod, jehož indukčnost a kapacita jsou realizovány pomocí vodiče o délce, která je mnohonásobně delší než průměr vodiče. Rezonance antény je ekvivalentní s rezonančním obvodem RLC. Anténa je v rezonanci tehdy, pokud je splněná podmínka, že délka vodiče je shodná jako celistvý násobek vlnové délky. Obecně lze rezonanční obvod popsat pomocí Thomsonova vztahu [7]:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \text{ [Hz]} \quad (1.9)$$

Naopak šířka pásma je ovlivněna konstrukcí antény. Důležitými parametry jsou fyzické rozměry aktivních prvků, jako je délka a průměr. Šířka pásma se pohybuje od řádu kHz, typické u antén pro krátké vlny, až do řádu desítek MHz pro antény patřící do oblasti velmi krátkých vln. U měřicích antén se šířka pásma využívá při konstrukci širokopásmovosti, díky čemuž jsou antény schopné měřit rušení v celém požadovaném frekvenčním spektru.

Z odměřené charakteristiky lze určit šířku pásma antény  $B$ , ta je dána rozdílem frekvencí  $f_{min}$  a  $f_{max}$ , které jsou určeny na charakteristice v bodech, kde dochází k poklesu intenzity pole o 3 dB vzhledem k maximální hodnotě, což je pokles, při kterém je výkon na vstupních svorkách antény poloviční.

$$B = \frac{f}{Q} \text{ [Hz]} \quad (1.10)$$

Kde:  $f$  ... frekvence [Hz]

$Q$  ... činitel jakosti LC obvodu

### 1.2.4 Účinnost magnetické smyčkové antény

Jedná se o jeden z nejdůležitějších parametrů antény. Udává hodnotu vyzařovacího odporu  $R_r$  podělenou ztrátovým odporem  $R_L$  a vyzařovacím odporem:

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_L} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (1.11)$$

Vyzařovací a ztrátový odpor vypočteme následujícím způsobem:

$$R_r = \frac{8 \cdot (120 \cdot \pi) \cdot \pi^3}{3} \cdot \frac{N^2 \cdot A^2}{\lambda^4} \text{ [\Omega]} \quad (1.12)$$

$$R_L = \frac{N \cdot D}{d} \cdot R_S \cdot \left( \frac{R_P}{R_0} + 1 \right) \text{ [\Omega]} \quad (1.13)$$



Kde:  $R_S$  ... povrchový odpor vodiče [ $\Omega$ ]

$R_P$  ... odpor blízko náležíčích vodičů [ $\Omega$ ]

$R_0$  ... odpor blízko náležíčích vodičů a vlivu skinefektu [ $\Omega$ ]

$A$  ... plocha hlavní smyčky [ $m^2$ ]

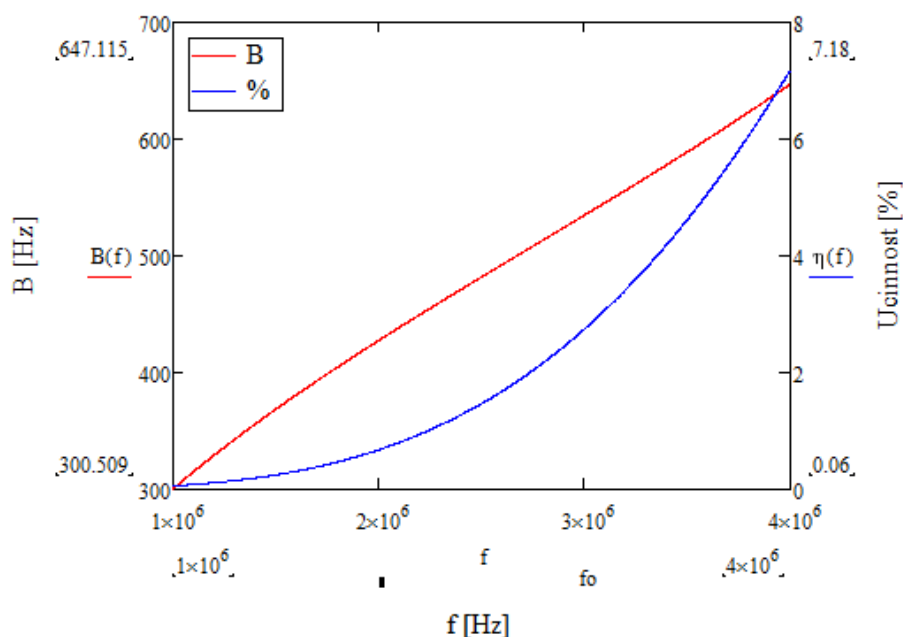
$N$  ... počet závitů smyčky antény

Pro přesný výpočet účinnosti antény je nutné znát přesnou hodnotu vyzařované a ztrátové energie, které lze určit pouze přibližně. Z toho důvodu je hodnota účinnosti antény pouze přibližná, nikoli přesná.

Definice účinnosti antény je jasná, je to poměr vyzařovacího a ztrátového odporu ( $R_r/(R_r+R_L) \cdot 100$  [%]) (viz vzorec 1.11)). Vyzařovací odpor antény je daný jejím typem a výškou nad zemí. Je to rezistence, do které se snažíme převést veškerou vyrobenou energii a vyzářit ji do prostoru. Pokud by neexistovaly už žádné jiné rezistence, tak by se nám to podařilo s účinností 100 % [13].

Bohužel existují i ztrátové rezistence. Je to nejenom odpor vlastního vodiče antény (nesmíme samozřejmě zapomenout ani na skinefekt), ale i přepočtené dielektrické ztráty v izolaci, v neposlední řadě to mohou být i ztráty vzniklé indukci v okolních předmětech [1]. Pokud např. kovová konstrukce bude mít délku blízkou polovině délky vlny našeho oblíbeného pásma, bude se i ona přičítat ke ztrátovému odporu, ale to je až příliš velká náhoda, předměty, které nejsou v přesné rezonanci, se na ztrátových odporech projevují jen minimálně.

Naším cílem je dosáhnout co nejvyššího vyzařovacího odporu a co nejnižších odporů ztrátových.



Obrázek 1.8: Závislosti účinnosti MLA na frekvenci (Mathcad) [14]

### 1.2.5 Vyzářený výkon

Radiové vlny představují energii elektromagnetického pole vyzařovaného do volného prostoru. Šíří se rychlostí světla a jsou tvořeny magnetickým a elektrickým polem, jež jsou vzájemně k sobě kolmá a také kolmá ke směru šíření. Intenzita elektrického a magnetického pole je taková, že jedna polovina energie vlny je ve tvaru elektrické a druhá ve tvaru magnetické energie.

Předpokladem dobrého fungování magnetické smyčkové antény je její kvalitní konstrukční provedení, včetně použití kvalitního materiálu. Při provozování této antény je nutné dbát zvýšené opatrnosti, hlavně pokud se jedná o vysílací anténu [6, 15]. Z tohoto důvodu, že se na živých částech antény tvořících rezonanční obvod, objevují vysoká napětí.

Kupříkladu, pokud chceme dosáhnout výkonu 100 W, tak se na kondenzátoru RC vyskytuje napětí v řádech jednotek kV a povrchové proudy (*skinefekt*) dosahují 100 A/mm<sup>2</sup> [16]. Již při výkonu 4 W nelze ze zdravotních důvodů anténu provozovat v blízkosti osob (toto upozornění platí zvláště pro osoby se srdečním stimulátorem). Od 50 W výše se nedoporučuje anténu používat v uzavřených a vnitřních prostorách. Při vyšším výkonu může anténa trvale poškodit elektrická zařízení, která nejsou elektromagneticky stíněna. Dále nutno zmínit, že zvýšit výkon na 100 W už může pouze osoba s koncesním oprávněním.

Vztah pro výpočet napětí na deskách kondenzátoru:

$$U_C = \sqrt{P_R \cdot X_L \cdot Q} \text{ [V]} \quad (1.14)$$

### 1.2.6 Zisk antény

Činitel zisku neboli zisk antény je určen vztahem:

$$G = \eta \cdot S \quad (1.15)$$

Kde:  $\eta$  ... vyjadřuje účinnost antény

$S$  ... absolutní činitel směrovosti

Zatímco směrovost antény se nejčastěji určuje výpočtem, je výhodnější určovat zisk měřením, tj. srovnáním intenzity pole měřené a referenční antény. Vlastnosti antény ověřujeme měřením jejich základních parametrů, jako je vstupní impedance, diagram záření a zisk.

Při měření antén je potřeba mít na paměti, že jde o vyzařovací systém, který může a v praxi bývá velmi často ovlivněn, jak rušením vnějšími elektromagnetickými zdroji, tak energií odrážejícími předměty v okolí vyšetřované antény. Přesnost měření pochopitelně závisí na přesnosti měřicího přístroje, ale zejména na dodržení dvou podmínek:

- způsob připojení přístroje k anténě nesmí ovlivnit měření (známé elektrické parametry spojovacího vedení, bez odrazové spojky, atd.)

- v blízkosti vyšetřované nebo nastavované (seřizované) antény nesmějí být žádné odrazné předměty zejména vodivého charakteru.

Přesné určení zisku nebo směrovosti je jedno z nejobtížnějších měření. Buď je možné určovat směrovost výpočtem z naměřených směrových diagramů, pak nepřesnost určení spočívá v tom, že obvykle neznáme celý prostorový diagram záření, nebo, což je častější, určujeme zisk vyšetřované antény porovnáním se ziskem antény referenční. V případě srovnávacího měření je třeba dodržet všechny výše uvedené podmínky s tím, že homogenita pole by měla být lepší než  $\pm 0,5$  dB. Důležitým požadavkem je velmi dobré impedanční přizpůsobení obou antén.

---

## 2 Plochá magnetická smyčková anténa

V předchozí kapitole bylo popsáno, že magnetická smyčková anténa může být sestrojena do mnoha podob. Většina tvarů této antény má společné to, že se hlavní smyčka vyrábí většinou z drátů nebo trubek o různém průměru. Tato kapitola je zaměřena na nový typ této antény pojmenované jako plochá magnetická smyčková anténa. Tento druh antény ke své funkčnosti nevyužívá žádný z výše uvedených provedení hlavní smyčky.

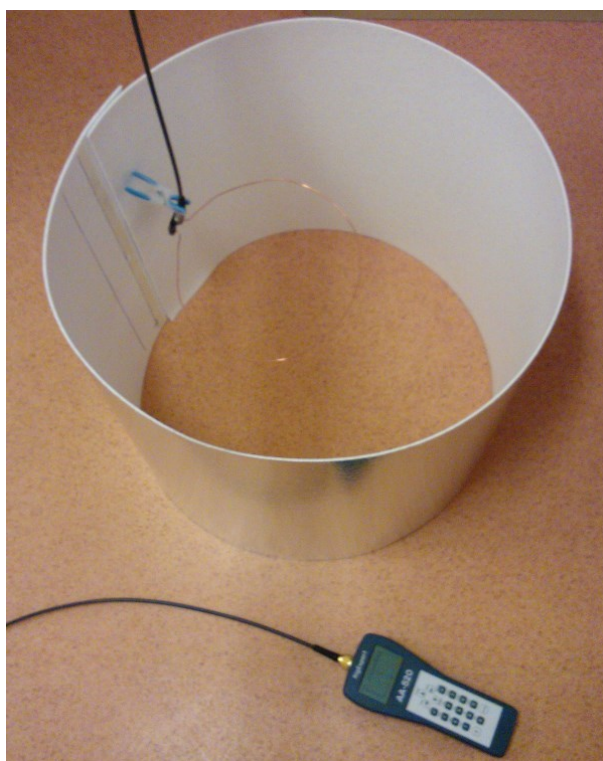
Plochá magnetická smyčková anténa vychází z konceptu klasické MLA, která byla popsána v předchozí kapitole. Plochá magnetická smyčková anténa je v podstatě cívka s kruhovým tvarem, kterou protéká vysokofrekvenční proud. Nejviditelnější změnou v porovnání magnetické smyčkové antény a ploché MLA je to, že vodič s kruhovým průřezem hlavní smyčky je nahrazen plochým vodičem. Pro náš případ jsme zvolili tepelnou izolační fólii, ale můžeme využít například i alobal, alimátku, atd. Při provádění měření ploché MLA byla využita zmíněná stínící tepelná fólie (používá se jako tepelná izolace za radiátory), která se skládá z izolantu (v našem případě se jedná o dielektrikum) – *polystyrén* a z vodivé části – *hliníkové fólie*.



*Obrázek 2.1: Izolační fólie využitá pro měření*

Tento použitý materiál má velkou výhodu v tom, že je polystyrén pevně zafixován k vodivé fólii. Tímto je zajištěno, že při přeložení materiálu nám vznikne kondenzátor, kde nebude docházet ke změnám kapacity vlivem nechtěného oddalování dielektrika od vodivé fólie.

Na obrázku níže je ukázáno, jak taková plochá MLA vypadá v praxi. Cílem této diplomové práce není vytvoření kompletní antény použitelné ve venkovním nebo vnitřním prostředí, ale jde pouze o vytvoření testovacího vzorku, pro zjištění chování a vlastností této antény.



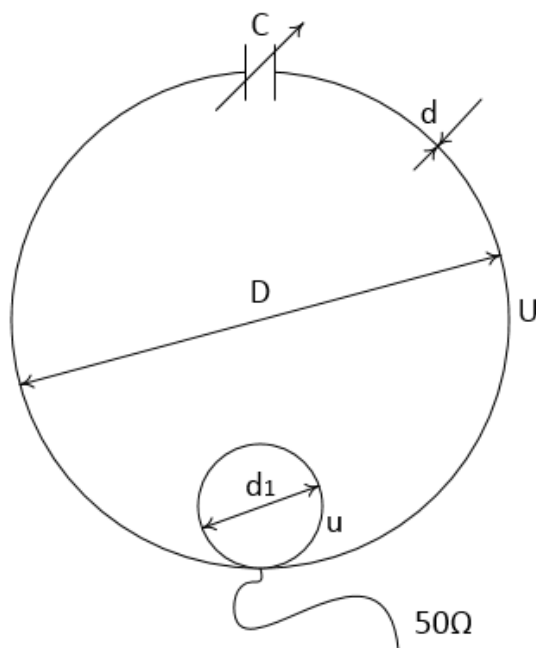
Obrázek 2.2: Funkční „prototyp“ ploché MLA

V rámci diplomové práce byl zvolen optimální kmitočet 27 MHz. Tento kmitočet se nachází v občanském pásmu (*Citizen Band – CB*), je to pásmo, na které není potřeba žádných zkoušek ani speciálních povolení. Občanské pásmo je provozováno na frekvenci 26,565 – 27,405 MHz, délka vlny je 11 m [17]. V České republice lze používat 80 kanálů (pásmo B, C), rozteč mezi kanály je 10 kHz, vysílat lze na těchto kanálech pouze frekvenční modulací s maximálním výkonem 4 W. Některé z kanálů jsou vyhrazeny pro specifické účely (svolávací kanál, nouzový kanál...). **Pozn.: pokud by se stalo, že bude mít MLA činitel Q okolo 100, tak už nedokáže přenést AM bez zkreslení.**

CB stanice se vyskytuje nejčastěji jako vozidlová (mobilní) stanice, která se po doplnění napájecím zdrojem 230/13,8 V používá jako domácí radiostanice. Specialitou jsou malé přijímače umožňující přeladění např. mezi dvěma kanály [18]. Díky jejich velikosti je možné vložit je např. do vystýlky parašutistické přilby.

## 2.1 Matematický aparát pro výpočet magnetické smyčkové antény

Matematické vzorce použité pro výpočty ploché MLA jsou shodné se vzorci pro výpočet klasické magnetické smyčkové antény, které byly uvedeny v předchozí kapitole. Tato kapitola ukazuje výpočet konkrétní MLA pro zadanou rezonanční frekvenci  $f_0 = 27 \text{ MHz}$  a poměr  $0,2 \lambda$ .



Obrázek 2.3: Označení anténních prvků pro výpočet

- Kde: U ... je obvod hlavní smyčky [m]  
 D ... je průměr hlavní smyčky [m]  
 d ... je průměr vodiče hlavní smyčky [m]  
 u ... je obvod vazební smyčky [m]  
 d<sub>1</sub> ... je průměr vazební smyčky [m]

### 2.1.1 Geometrie magnetické smyčkové antény

V první řadě je nutné si převést plochou smyčku na ekvivalent v kruhovém průřezu, aby bylo možné využít vzorců pro MLA. Potřebný vzorec pro výpočet nese název aproximovaný poloměr a je definován tak, že pokud bude dipól z tenké pásky se šířkou  $a$ , potom ekvivalentní poloměr je:

$$r \doteq 0,25 \cdot a \text{ [m]} \quad [17] \quad (2.1)$$

Kde:  $a$  ... je výška fólie, což je v našem případě  $0,45 \text{ m}$

$$r = 0,25 \cdot 0,45 = \underline{0,11 \text{ m}}$$

Po dosazení do vzorce nám vyšla velikost poloměru, kterou je nutné vynásobit dvěma, abychom dostali požadovanou velikost průměru vodiče pro kruhový průřez, což je  $d = 0,22 \text{ m}$ . Jakmile známe tuto hodnotu, tak nám již nic nebrání ve využití vzorců pro MLA.

Následující krok bude věnován výpočtu důležitého parametru magnetické smyčkové antény a to délce vlny  $\lambda$ , kterou vypočteme ze vztahu:

$$\lambda = \frac{c}{f_0} = \frac{3 \cdot 10^8}{27 \cdot 10^6} = \underline{11,11 \text{ m}} \quad (2.2)$$

pokud známe délku vlny, tak můžeme vypočítat obvod hlavní smyčky  $U$ :

$$U = 0,2 \cdot \lambda = 0,2 \cdot 11,11 = \underline{2,22 \text{ m}} \quad (2.3)$$

z obvodu hlavní smyčky lze spočítat její průměr  $D$ :

$$D = \frac{U}{\pi} = \frac{2,22}{\pi} = \underline{0,71 \text{ m}} \quad (2.4)$$

následně je možné provést výpočet průměru  $d_1$  a obvodu  $u$  pro vazební smyčku:

$$d_1 = \frac{D}{5} = \frac{0,71}{5} = \underline{0,14 \text{ m}} \quad (2.5)$$

$$u = \pi \cdot d_1 = \pi \cdot 0,14 = \underline{0,44 \text{ m}} \quad (2.6)$$

### 2.1.2 Elektrické vlastnosti magnetické smyčkové antény

Díky těmto výpočtům již zhruba víme, jakých velikostí bude výsledná anténa dosahovat. K vytvoření obvodu hlavní smyčky bude zapotřebí přibližně 2,2 m vodivé fólie a pro vazební smyčku bude potřeba 0,4 m vodiče. Dále bude vypočtena přibližná indukčnost obvodu  $L$  dle vztahu:

$$L = 0,2 \cdot U \left( \ln \frac{U}{d} - 1,07 \right) = 0,2 \cdot 2,22 \cdot \left( \ln \frac{2,22}{0,22} - 1,07 \right) = \underline{0,54 \mu H} \quad (2.7)$$

pokud známe indukčnost obvodu, tak pokračujeme výpočtem rezonanční kapacity  $C_{REZ}$ :

$$C_{REZ} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_0)^2 \cdot L} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 27 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,54 \cdot 10^{-6}} = \underline{64,07 \text{ pF}} \quad (2.8)$$

v dalším kroku vypočteme vlastní kapacitu smyčky  $C_{loop}$ :

$$C_{loop} = 2,69 \cdot U = 2,69 \cdot 2,22 = \underline{5,98 \text{ pF}} \quad (2.9)$$

a výsledná (skutečná) kapacita obvodu  $C$  je dána vztahem:

$$C = C_{REZ} - C_{loop} = 64,07 \cdot 10^{-12} - 5,98 \cdot 10^{-12} = \underline{58,10 \text{ pF}} \quad (2.10)$$

Další blok výpočtů bude zaměřen na výpočet kapacitní reaktance  $X_C$ , kterou je možné vypočíst dle vztahu:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C_{REZ}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 27 \cdot 10^6 \cdot 64,07 \cdot 10^{-12}} = \underline{92 \Omega} \quad (2.11)$$

následuje výpočet vyzařovacího odporu  $R_r$  a ztrátového odporu  $R_Z$ :

$$\begin{aligned} R_r &= 33,8 \cdot 10^{-9} \cdot (f_0^2 \cdot 10,76 \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4})^2 \\ &= 33,8 \cdot 10^{-9} \cdot (27^2 \cdot 10,76 \cdot \pi \cdot \frac{0,71^2}{4})^2 = \underline{0,3211 \Omega} \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$R_Z = 82,98 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f_0} \cdot \frac{U}{d} = 82,98 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{27} \cdot \frac{2,22}{220} = \underline{0,0042 \Omega} \quad (2.13)$$

pokud známe vyzařovací a ztrátový odpor, potom lze spočítat účinnost  $\eta$ :

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_Z} \cdot 100 = \frac{0,3211}{0,3211 + 0,0042} \cdot 100 = \underline{98,7 \%} \quad (2.14)$$

dále bude spočítána kvalita  $Q$  a šířky pásma (pro pokles o 3 dB)  $B$ :

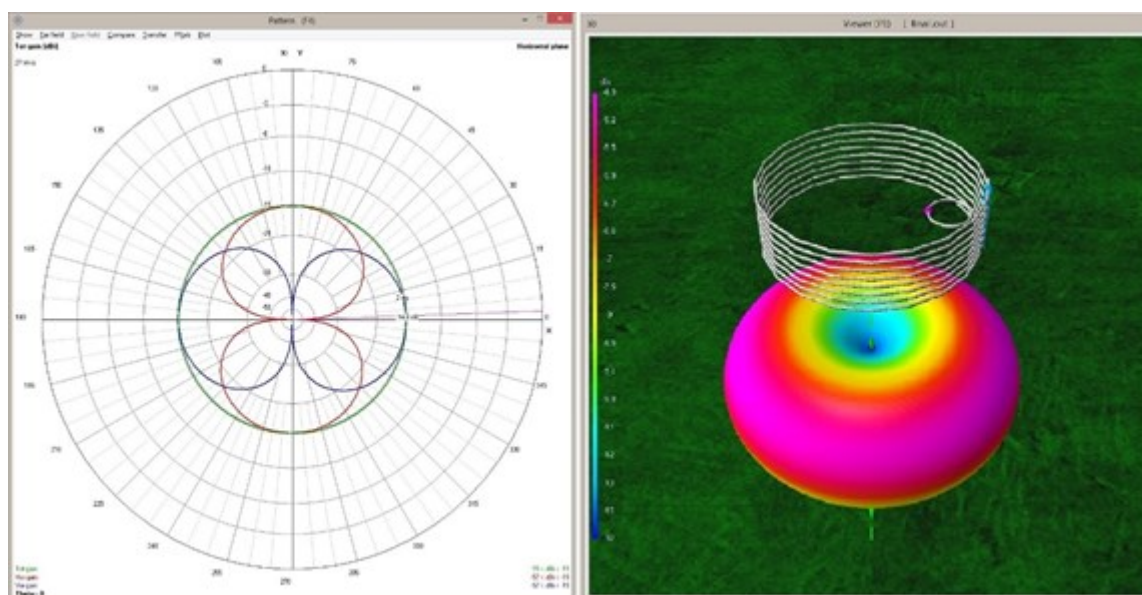
$$Q = \frac{X_C}{2 \cdot (R_r + R_Z)} = \frac{92}{2 \cdot (0,3211 + 0,0042)} = \underline{141} \quad (2.15)$$

$$B = \frac{f_0}{Q} = \frac{27 \cdot 10^6}{141} = \underline{191,487 \text{ kHz}} \quad (2.16)$$

## 2.2 Simulace – 4NEC2

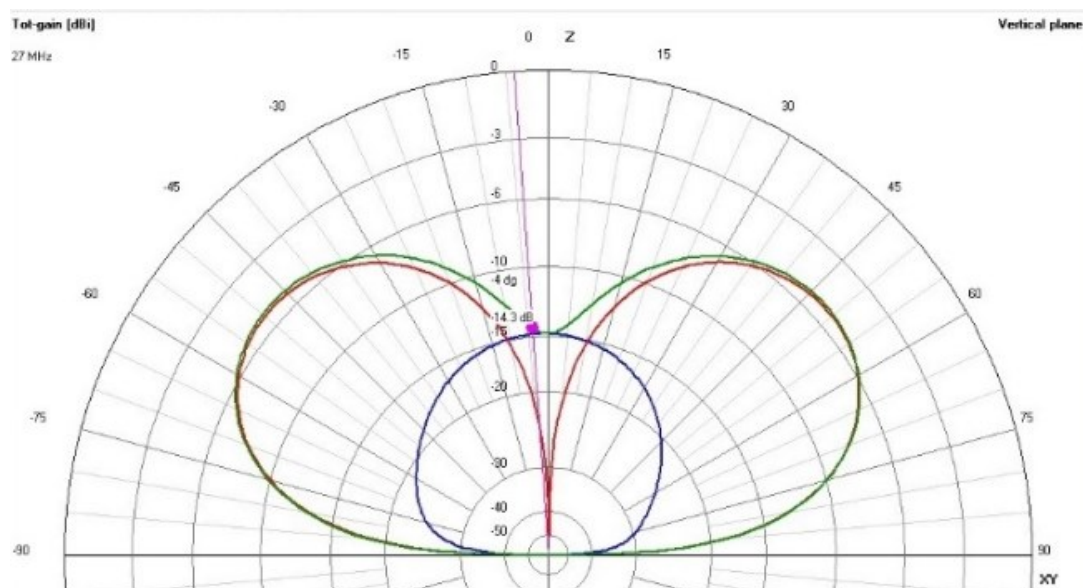
4nec2 je freeware program pro simulaci antén. Obsahuje nástroje pro vytváření, prohlížení, optimalizaci a kontrolu 2D i 3D stylu struktury antény. Dále zahrnuje geometrické nástroje pro kreslení antén. Tento program je vhodný jak pro začátečníky, tak i zkušené návrháře antén.





Obrázek 2.4: Horizontální a 3D charakteristika ploché MLA

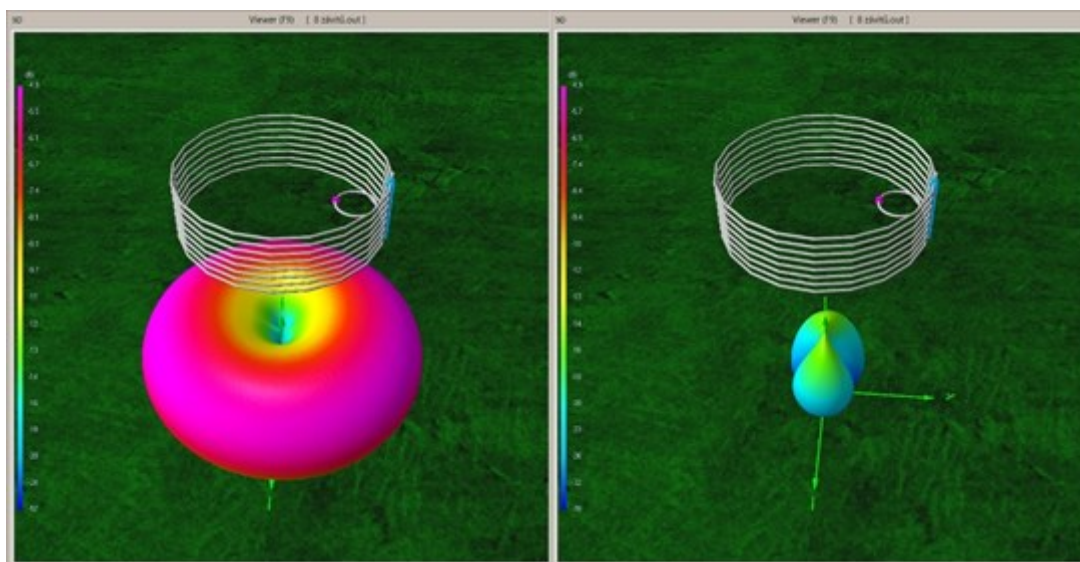
V tomto programu byla namodelovaná i plochá smyčková anténa. Model antény v tomto programu byl sestaven podle vypočtených a zadaných parametrů. Prstenec hlavní smyčky byl vytvořen z několika obručí, každá obruč byla doplněna o potřebnou kapacitu. Na obrázku 2.4 v levé části vidíme horizontální vyzařovací charakteristiku ploché magnetické smyčkové antény. V pravé části je zobrazena jak vymodelovaná anténa, tak i její kompletní vyzařovací diagram (*tot-gain*) označený zelenou barvou. Kompletní vyzařovací charakteristiku jsme získali ze dvou charakteristik (horizontální a vertikální), které jsou ve tvaru číslice osm, což je charakteristické pro magnetické smyčkové antény.



Obrázek 2.5: Vertikální charakteristika ploché MLA

Na obrázku výše (2.5) je zobrazena výsledná vertikální vyzařovací charakteristika této antény. V diagramu je červenou barvou označena horizontální vyzařovací charakteristika, modrá barva značí vertikální vyzařovací charakteristiku a kompletní vyzařovací diagram je označen barvou zelenou.

Jak již bylo zmíněno výše, program 4NEC2 umí vytvářet 3D náhledy vyzařovacích charakteristik. Na obrázku 2.6 je ve 3D zobrazena jak vertikální, tak horizontální charakteristika ploché magnetické smyčkové antény. Z tohoto obrázku je patrné, že využití ploché magnetické smyčkové antény je hlavně v horizontální rovině.



Obrázek 2.6: Citlivost na horizontální (vlevo) a vertikální (vpravo) polariz. vlnu

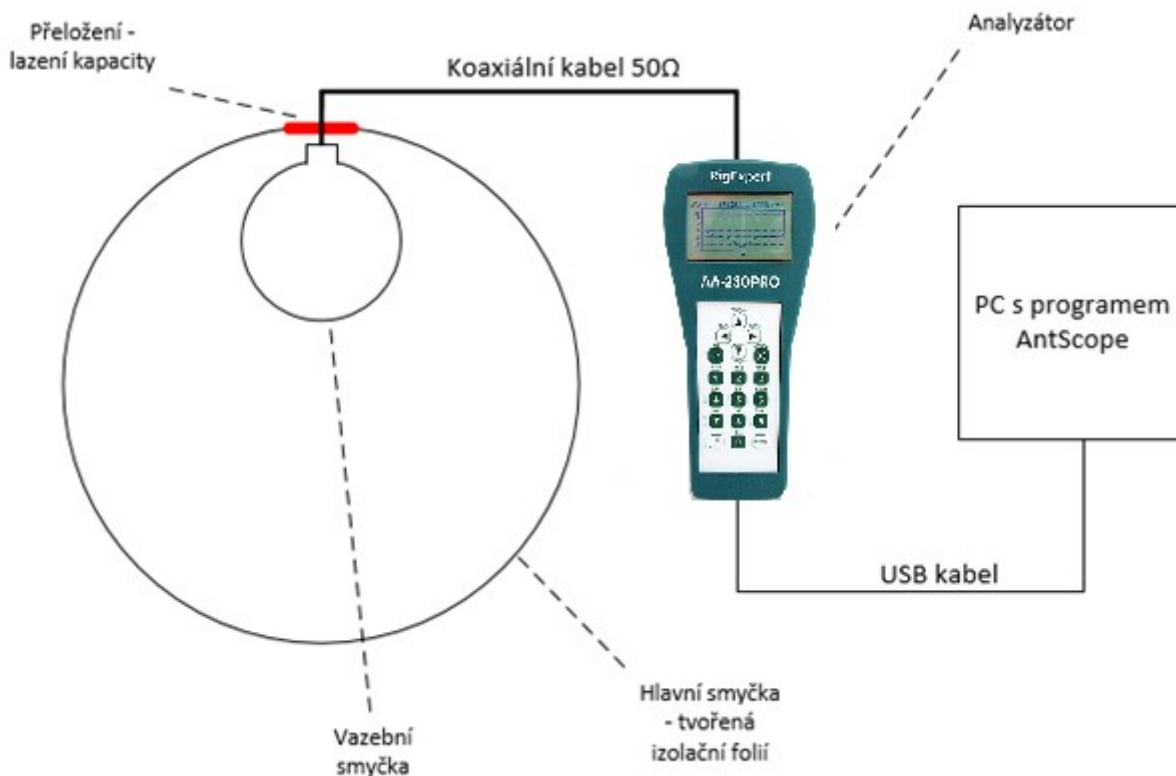
## 2.3 Praktické ověření funkce ploché magnetické smyčkové antény

Důležitým faktorem v anténní technice je PSV (*Poměr Stojatých Vln - anglicky SWR*) neboli ČSV (*Činitel Stojatých Vln*) je v konečném důsledku jedním z důležitých ukazatelů účinnosti celého vysílacího zařízení. V podstatě jde o to, že všechny součásti, jako výstup vysílače, vysokofrekvenční vedení (koaxiální kabel) a anténa musí být k sobě impedančně přizpůsobeny - jejich impedance na daném kmotočtu musí být shodná [19, 20]. Pokud nastane tento stav, je SWR rovno 1. Většinou se za ideální stav považuje SWR o hodnotách 1,1 - 2. Poměr stojatých vln vyšší přípustné hodnoty než 3 může způsobovat již větší problémy.

Tabulka 2.1: Tabulka SWR

SWR	Vyzářený výkon	Vyzářený výkon
[-]	[%]	[W]
1,0	100	4,00
1,2	99	3,96
1,5	95	3,80
2	89	3,56
3	75	3,00
5	55	2,20
10	34	1,36
20	18	0,72

V podkapitolách níže jsou obsažena různá měření pro pochopení principu ploché magnetické smyčkové antény. K měření je zapotřebí anténní analyzátor, který umí měřit SWR, X, R, C...



Obrázek 2.7: Schéma zapojení

K sestrojení modelu ploché MLA potřebujeme nůžky na papír, metr a oboustrannou lepicí pásku. Pro měření zadané frekvence 27 MHz byla sestrojena hlavní smyčka z izolační fólie o délce 180 cm, přeložení dvou konců této „jedno-závitové“ cívky bylo po řadě testů nastaveno na 4,5 cm. **Nutno dodat, že velikost přeložení hlavní smyčky mění frekvenci. Čím je přeložení menší, tím je frekvence vyšší.** Protože je materiál hlavní smyčky velice měkký, může docházet k oddalování konců přeložení, což je nežádoucí. Z tohoto důvodu se velice osvědčila oboustranná lepicí páska, která oba konce hlavní smyčky k sobě perfektně zafixuje.

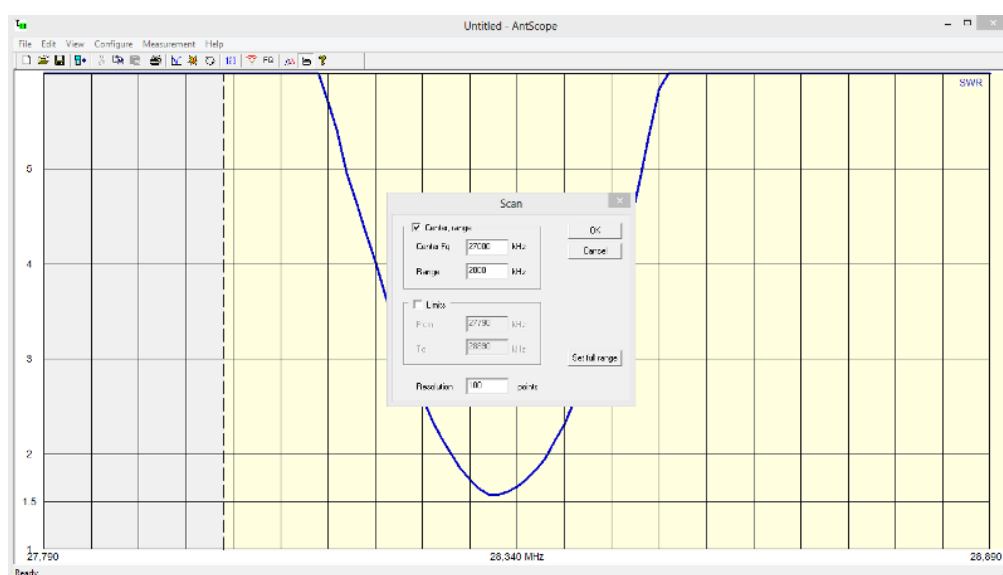
Měření bylo provedeno ve venkovních prostorech, aby se v okolí antény nevyskytovaly žádné nežádoucí kovové předměty, jako jsou například zárubně dveří, kovové rámy oken atd., které představují závity nakrátko. Takovéto předměty se při zkoušení antén nesmějí v blízkosti vyskytovat, protože silně ovlivňují vyzařování. Je to stejné, jako bychom poblíž umístili další MLA se zkratem na napájecí.

„Válec“ tvořící hlavní smyčku byl zavěšen na silonová lanka (cca 120 cm nad zemí) a v okolí byly odklizeny veškeré kovové věci v min. vzdálenosti 5 m, aby nedocházelo ke zkreslování měření okolními jevy. Doprostřed válce byla spuštěna vazební smyčka, která byla vzdálená cca 5 cm od přeložení. Vazební smyčka poté byla pomocí redukce připojena na koaxiální kabel o impedanci 50 Ω.



Obrázek 2.8: Fotografie pracoviště

Samotné měření probíhalo připojením budicí smyčky na koaxiální kabel a ten byl připojen do analyzátoru. Využil jsem SWR metr **RigExpert AA-230PRO**, jedná se o model určený pro profesionální provoz i radioamatéry, umožňuje snadné ovládání, měření v různých režimech, možnost ukládání výsledků měření do paměti k pozdějšímu zpracování [21]. Tento přístroj má frekvenční rozsah 0,3 - 230 MHz (frekvenční rozlišení 1 kHz), nastavitelnou referenční impedanci, obsahuje 16 bitový A/D převodník, dále má ochranu vstupního tranzistoru proti statické elektřině, obsahuje baterii, takže je možné měření i bez externího zdroje. Přístroj obsahuje displej, který umí graficky zobrazit průběh signálu. Propojení je možné přes konektor typu N. Tento SWR metr umožňuje propojení s počítačem pomocí USB. Díky tomu byly vidět aktuální změny parametrů antény přímo v počítači – v programu AntScope verze 4.2.25.



Obrázek 2.9: Software AntScope



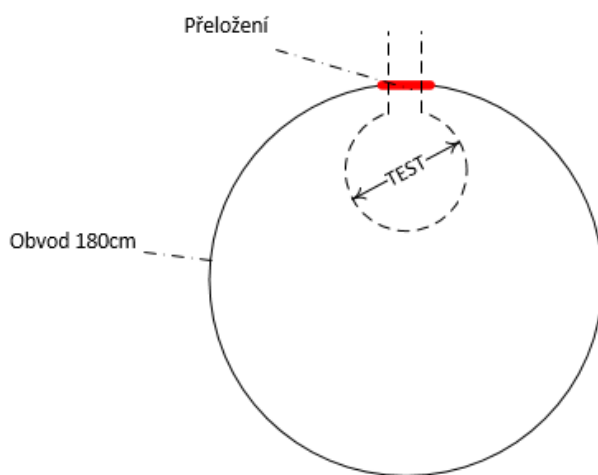
### 2.3.1 Vliv velikosti vazební smyčky

#### a) Cíl měření:

Princip tohoto měření spočívá v hledání ideální délky budicího obvodu a následně vybrání nejlepší varianty pro další měření. Při tomto měření je nutné, aby se pokud možno nepohybovalo s hlavní smyčkou, jinak může docházet ke zkreslení měření. K tomuto měření bude vytvořena simulace v programu 4NEC2.

#### b) Popis měření:

Vazební smyčka byla umístěna do středu hlavní smyčky, jak již bylo zmíněno výše. Pro toto měření byly zvoleny čtyři délky měděného odizolovaného kabelu o stejném průměru a to 2,5 mm. Měření probíhalo tak, že se měnila velikosti vazebních smyček, ale ostatní parametry obvodu zůstávaly stejné.



Obrázek 2.10: Testování velikosti vazební smyčky

Výsledky měření jsou zaznamenány v tabulce níže.

Kde:  $f$  ... frekvence antény [kHz]

SWR ... poměr stojatých vln

$|Z|$  ... absolutní hodnota impedance antény [ $\Omega$ ]

$R$  ... vyzařovací odpor antény [ $\Omega$ ]

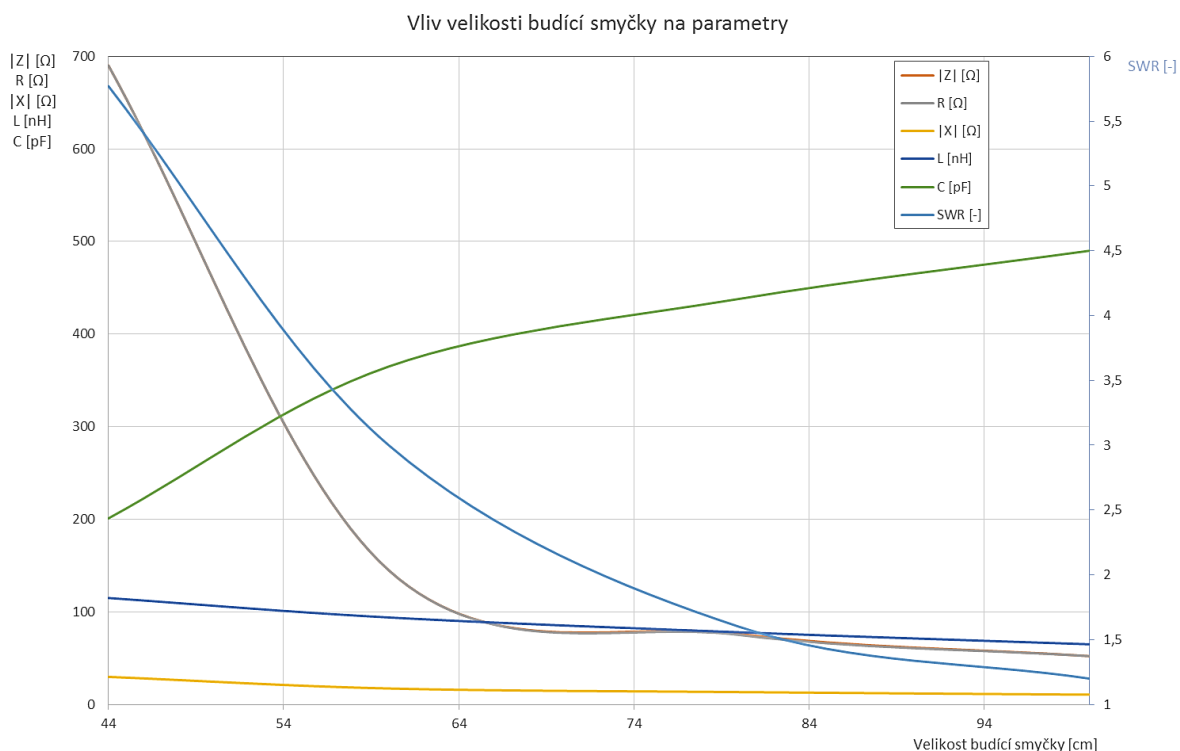
$|X|$  ... reaktance antény [ $\Omega$ ]

$L$  ... indukčnost antény [nH]

$C$  ... kapacita antény [pF]

Tabulka 2.2: Vliv délky vazební smyčky

Délka budící smyčky	f	SWR	Z	R	X	L	C
[cm]	[kHz]	[-]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[nH]	[pF]
44	27088	5,77	690,0	690,0	29,8	115	201
60	27088	3,0	145,0	145,0	17,3	94	365
80	27088	1,6	76,3	75,1	13,4	78	438
100	27088	1,2	52,3	52,3	10,6	65	490



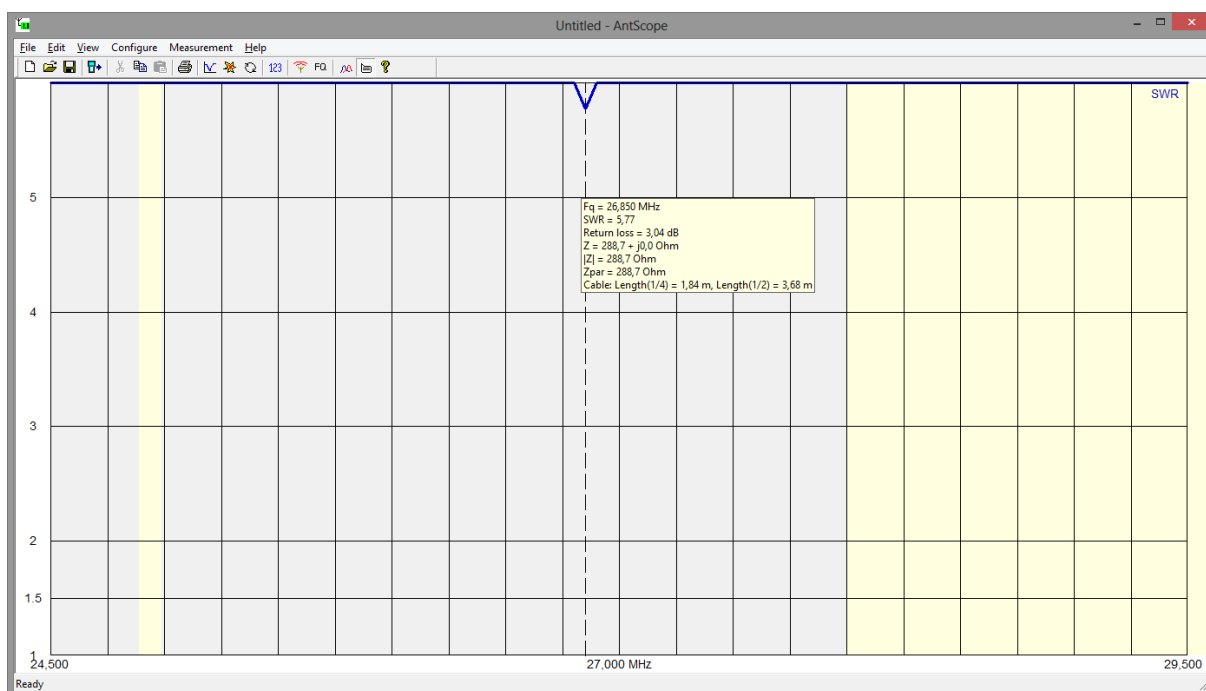
Obrázek 2.11: Charakteristika vlivu velikosti bud. smyčky na parametry

### c) Závěr:

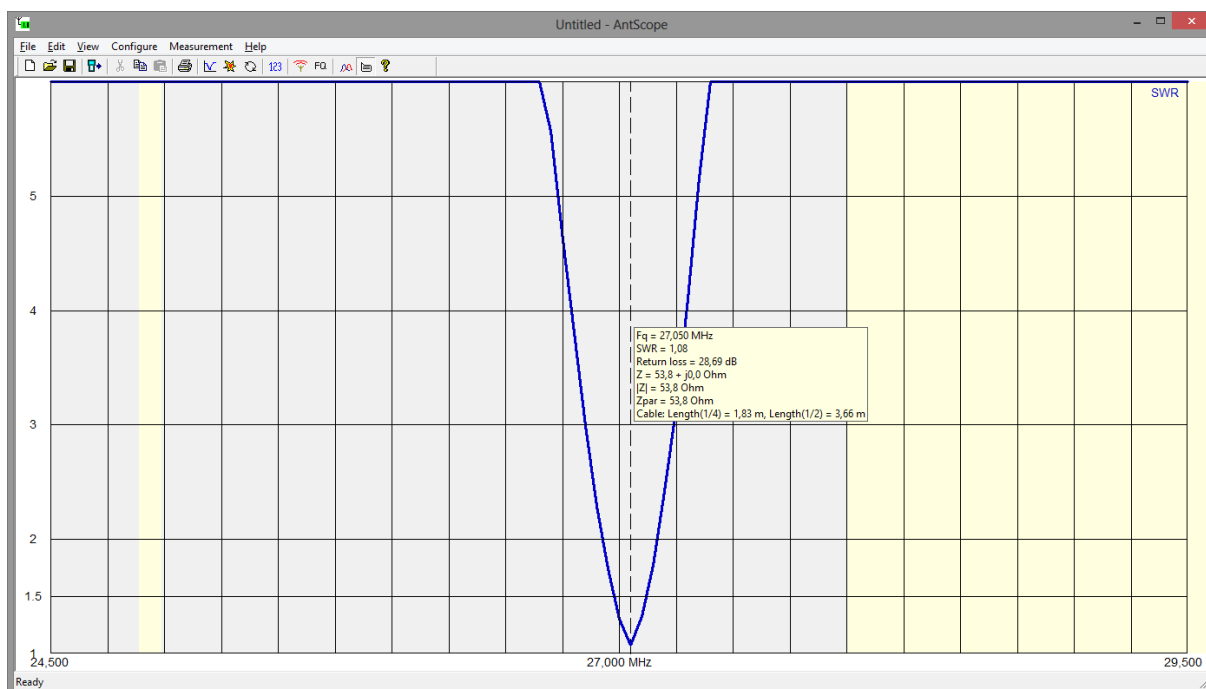
Z tabulky je patrné, že nejlepší hodnotu poměru stojatých vln (*SWR*) má smyčka s největší délkou tj. 100 cm. Pro následující měření ale byla zvolena z praktického hlediska délka 80 cm, která má sice trochu horší hodnotu *SWR*, ale z hlediska rozměru je výhodnější.

Pokud se vrátíme k výpočtům z předchozí kapitoly, zjistíme, že doporučená vypočtená délka vazební smyčky vyšla 44 cm, což se ale v praxi ukázalo jako nedostatečné. Dále je z grafu patrné, že se zvyšující se délkou vazební smyčky, klesají veškeré měřené anténní parametry, až na kapacitu, která naopak se zvyšující délkou roste.

Analyzátor umožňuje přímo vykreslovat naměřené hodnoty (jak můžeme vidět například na obrázku 2.12), což velice usnadňuje práci.

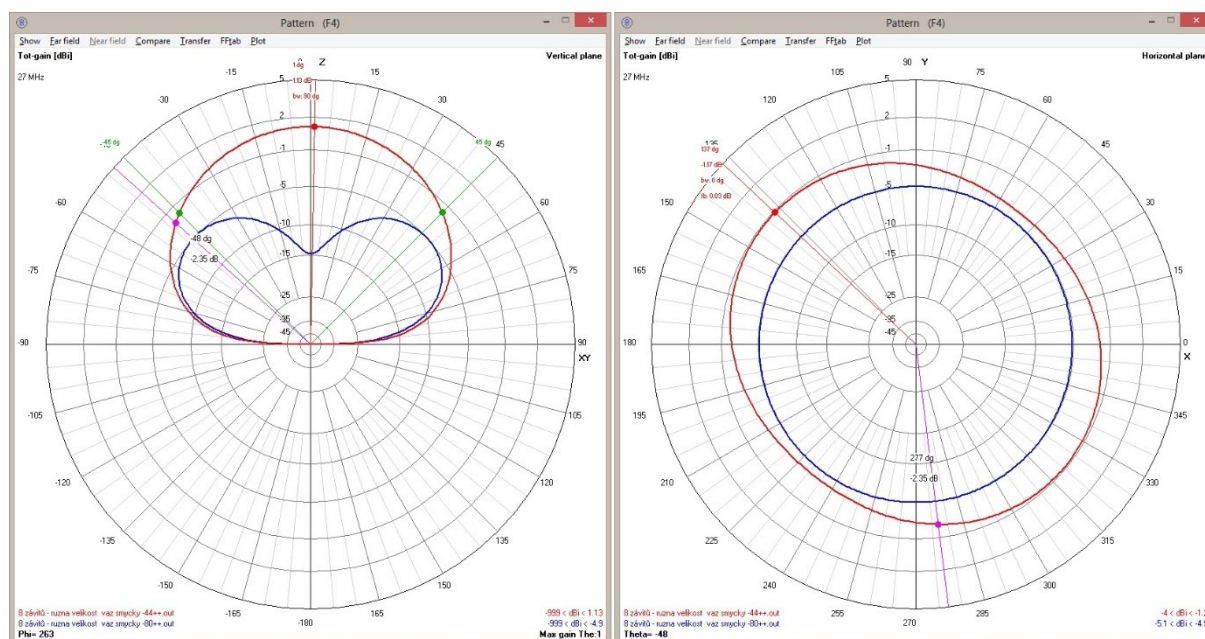


Obrázek 2.12: Porovnání: SWR budící smyčky pro délku 44 cm



Obrázek 2.13: Porovnání: SWR budící smyčky pro délku 100 cm

Na obrázcích 2.12 a 2.13, je zobrazeno porovnání nejmenší a největší smyčky budícího obvodu. Z grafů vyplývá, že hodnota SWR je u nejkratší smyčky naprosto nedostatečná. Na rozdíl od toho jsme se se smyčkou o délce 100 cm dostali na výbornou hodnotu.



Obrázek 2.14: Vertikální (vlevo) a horizontální (vpravo) vyzářovací charakteristika při změně velikosti vazební smyčky

Na obrázku 2.14 je zobrazeno porovnání, co se stane, pokud změním velikost vazební smyčky ze 44 cm na 80 cm. Výsledek je zobrazen vertikální i horizontální vyzářovací charakteristikou. Červeně naznačená charakteristika je pro vazební smyčku s odpovídající délkou 44 cm, modrá pro 80 cm.

### 2.3.2 Umístění budicího obvodu

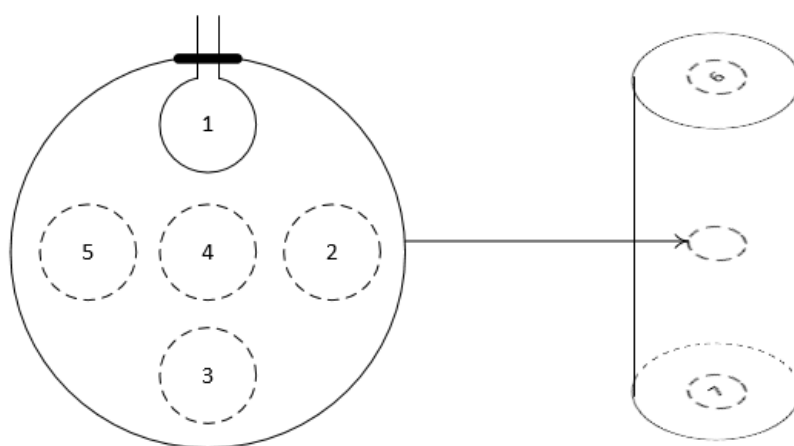
#### a) Cíl měření:

Tato podkapitola bude věnována vlivu umístění budicí smyčky, protože v některých materiálech je popsáno, že nejvhodnější je umístit budicí smyčku naproti přeložení (obr. 2.15 - 3), v jiných je uvedeno, že umístění této smyčky kdekoliv v obvodu nemá vliv na parametry antény, atd. Z toho důvodu bude ověřeno umístění této vazební smyčky uvnitř smyčky hlavní a tím tak budou ověřeny některé poznatky. Veškeré parametry obvodu zůstávají stejné z předchozích kapitol. V závěru této kapitoly bude provedena simulace v programu 4NEC2.

#### b) Popis měření:

Principem tohoto měření je najít, pokud možno, ideální místo v hlavní smyčce (obvod 180 cm) pro umístění budicí smyčky (obvod 80 cm).





Obrázek 2.15: Místa měření

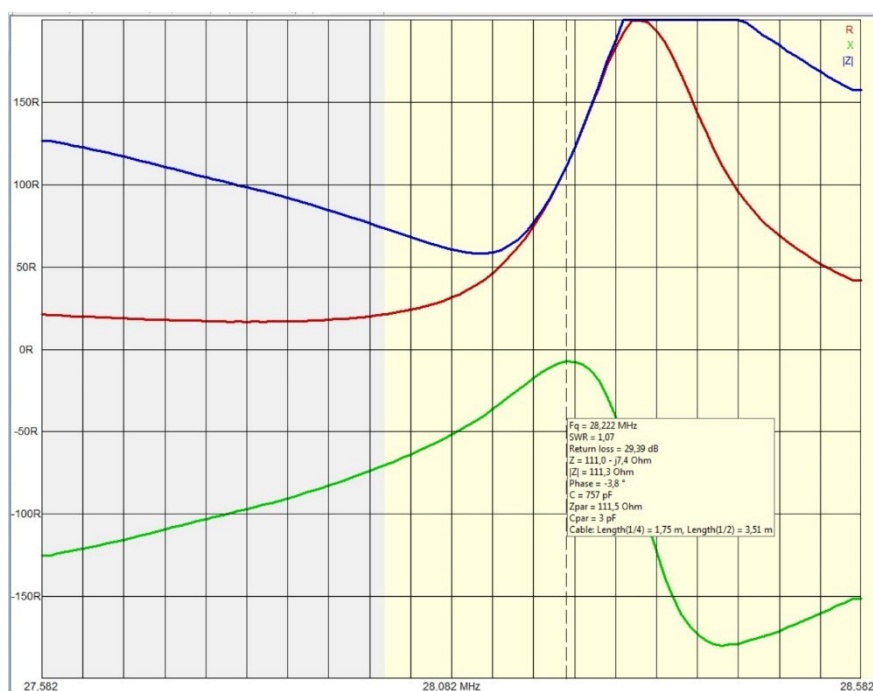
Bylo provedeno celkem sedm měření na vyznačených místech. Z toho pět měření bylo provedeno v doporučené pozici, tj. v pomyslném středu válce hlavní smyčky, a zbylá dvě měření byla provedena v horní a spodní části válce (viz obrázek 2.15).

Tabulka 2.3: Chování vazební smyčky v závislosti na pozici

Pozice (viz schéma)	f	SWR	Z	R	X	L	C
	[kHz]	[-]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[nH]	[pF]
1.	27088	2,1	93,1	73,0	57,8	340	101
2.	27088	3,1	88,5	54,8	69,5	408	84
3.	27088	2,2	64,9	42,2	49,2	289	119
4.	27088	3,1	98,7	91,7	67,9	398	86
5.	27088	3,1	69,0	42,9	54,0	317	99
6.	27088	3,4	146,5	130,8	65,9	387	89
7.	27088	3,3	135,7	120,7	53,5	296	95

c) **Závěr:**

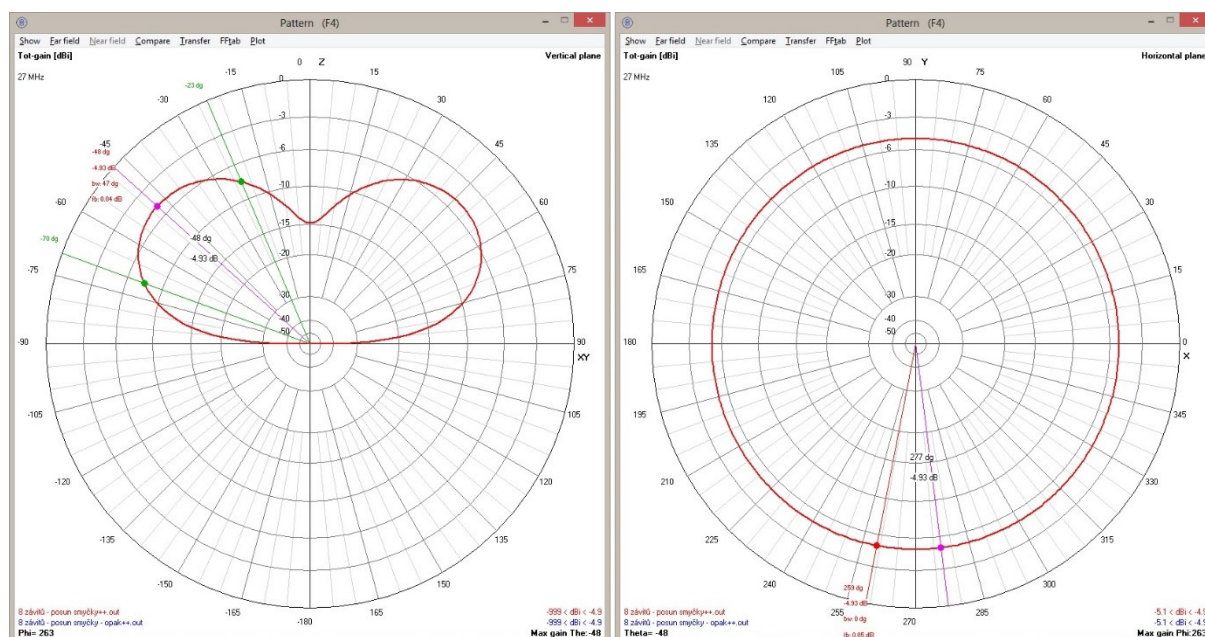
Z tabulky je patrné, že nejvýhodnější pozice pro umístění budicí smyčky (bráno k nejnižší hodnotě SWR) je ve středu výšky válce. A dále by se měla smyčka nacházet buď na nejbližší (pozice v tabulce č. 1), nebo nejvzdálenější (pozice v tabulce č. 3) straně spoje - přeložení.



Obrázek 2.16: Graf průběhu  $R$ ,  $X$ ,  $Z$

Z obr. 2.16 vyplývá, že při resonanci má MLA, jakožto paralelní rezonanční obvod, pouze reálnou složku impedance, kterou představuje činný odpor  $R$ . V důsledku rozladění od pracovního kmitočtu, který v tomto případě byl 28,22 MHz, dochází k razantnímu poklesu reálné složky a k nárůstu reaktance.

Pokud bychom charakteristiku vykreslovali dál, zjistili bychom, že tento děj se periodicky opakuje s krokem násobku vlnové délky. To je charakteristické pro tento typ antény. Je to způsobeno tím, že pokud je anténa naladěna na určitou frekvenci, tak automaticky zpracovává i její  $n$ -násobky.



Obrázek 2.17: Vert. (vlevo) a horizont. (vpravo) vyzařovací char. při změně umístění vazební smyčky

V programu 4NEC2 byly provedeny dvě simulace, co se stane, pokud umístím vazební smyčku blíže nebo dále k místu přeložení. Bylo zjištěno, že ačkoliv se tento vliv v praktickém měření hodně promítnul na parametrech antény, tak na simulaci neměl vůbec žádný vliv. Z obrázku 2.17 je vidět, že obě vyzařovací charakteristiky jsou naprosto shodné - překryté.

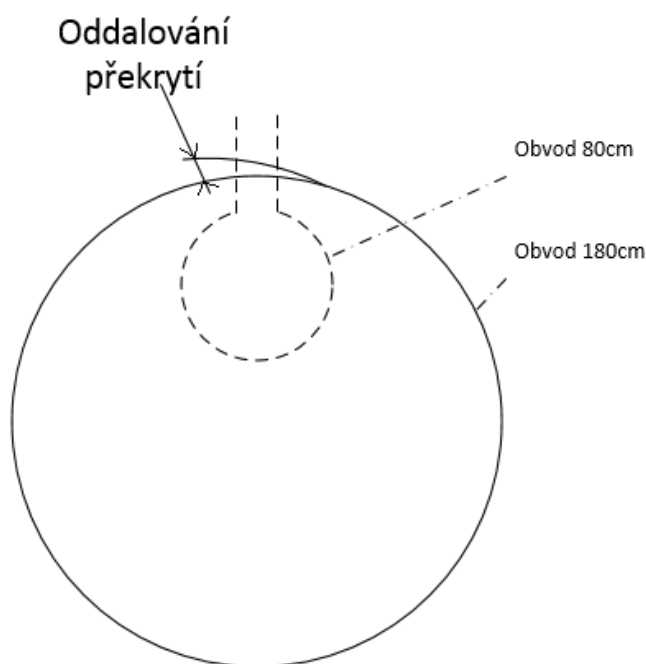
### 2.3.3 Změna kapacity

#### a) Cíl měření:

Cílem tohoto měření je zjistit, jaký má vliv oddalování konců přeložení hlavní smyčky na celkový obvod. K tomuto měření byla vytvořena simulace v programu 4NEC2.

#### b) Popis měření:

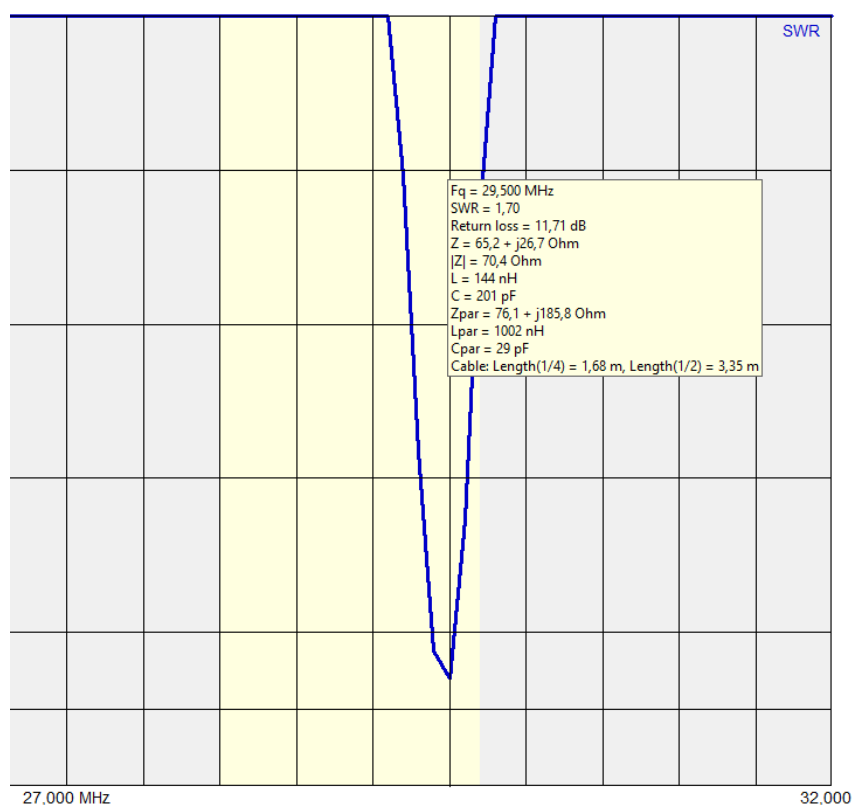
Měření probíhalo tak, že se jeden konec přeložení zafixuje např. již zmíněnou oboustrannou lepicí páskou, aby se neotvíral. Za to druhý konec necháme volný – pomocí něj totiž budeme nastavovat oddálení.



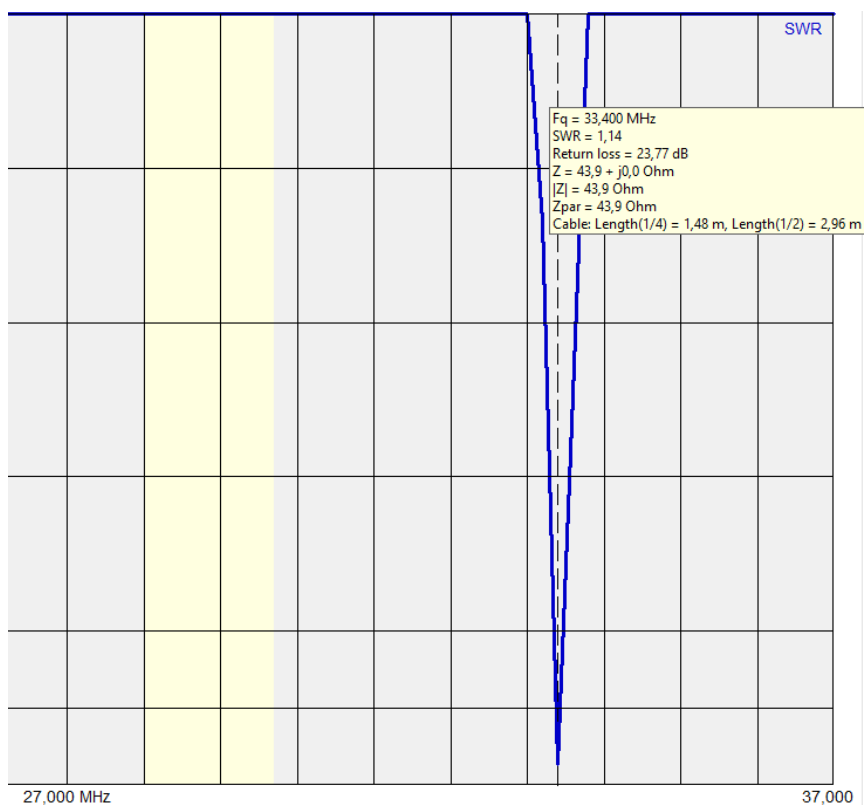
Obrázek 2.18: Ukázka změny kapacity

#### c) Závěr:

Byl proveden pokus s oddálením pro vytvoření dodatečného vzduchového dielektrika o šířce 1 cm a 2 cm. Výsledky jsou nejlépe patrné na dvou obrázcích níže (2.19 a 2.20). Z těchto zobrazení jde skvěle vidět, že oddálení má nejenom vliv na rezonanční frekvenci obvodu, ale také na strmost úhlu otevření antény (její frekvenční selektivitu), jejíž příčinou je extrémně vysoké Q.

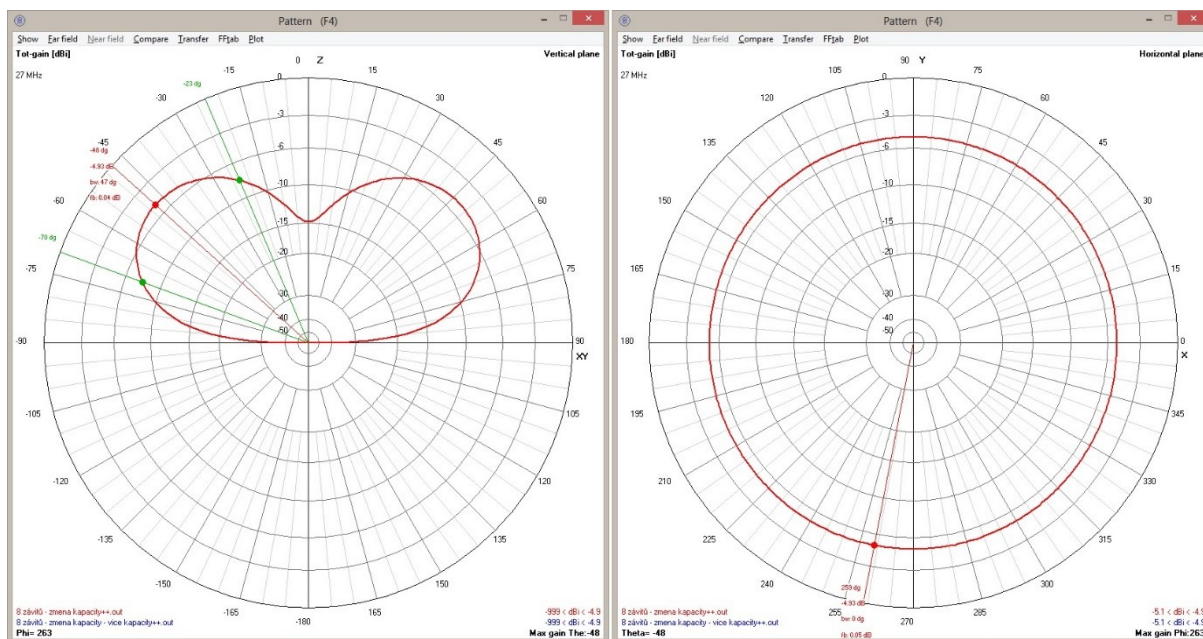


Obrázek 2.19: Porovnání: Oddálení konců smyčky o 1 cm



Obrázek 2.20: Porovnání: Oddálení konců smyčky o 2 cm

Pokud anténa není dost selektivní, hledejme chybu! Čím bude anténa selektivnější, tím můžeme předpokládat její vyšší účinnost a naopak. I bez měřicího parku je selektivita antény prvním ukazatelem toho, zda se nám podařilo/nepodařilo úspěšně vyřešit kritická místa magnetické smyčkové antény [3].



Obrázek 2.21: Vertikální (vlevo) a horizontální (vpravo) vyzařovací charakteristika při změně kapacity

Obdobně, jak se ukázalo v předchozí podkapitole, že velikost vazební smyčky namodelované v programu 4NEC2 nemá absolutně žádný vliv na parametry obvodu, tak je tomu i v této simulaci. Bylo zjištěno, ačkoliv měníme jakkoliv kapacitu hlavní smyčky, tak výsledná vyzařovací charakteristika zůstává naprosto stejná. Tudíž z obrázku 2.21 je vidět, že obě vyzařovací charakteristiky jsou naprosto shodné - překryté.

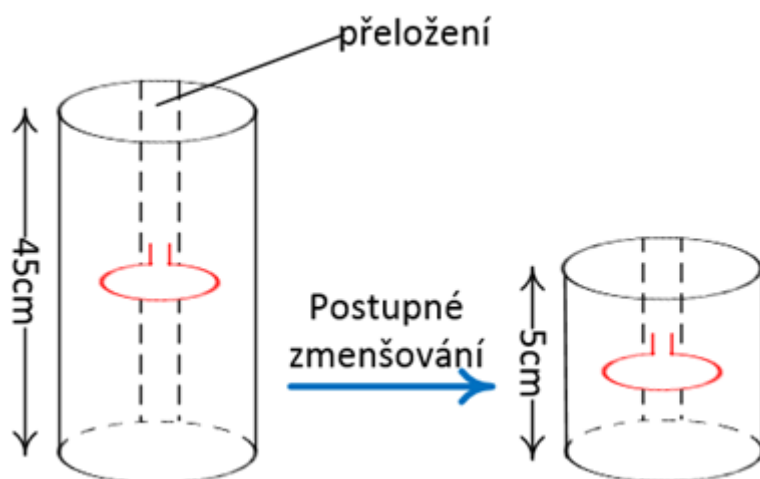
### 2.3.4 Změna šířky válce

#### a) Cíl měření:

Princip tohoto měření spočívá ve snižování šířky „válce“ hlavní smyčky a následné zjišťování tohoto vlivu na činitel stojatých vln. K tomuto měření byla vytvořena simulace v programu 4NEC2.

#### b) Popis měření:

Vazební smyčka bude vždy umístěna uprostřed výšky hlavní smyčky a cca 5 cm vzdálená od přeložení. Při každém měření bude změněna šířka hlavní smyčky (válce).

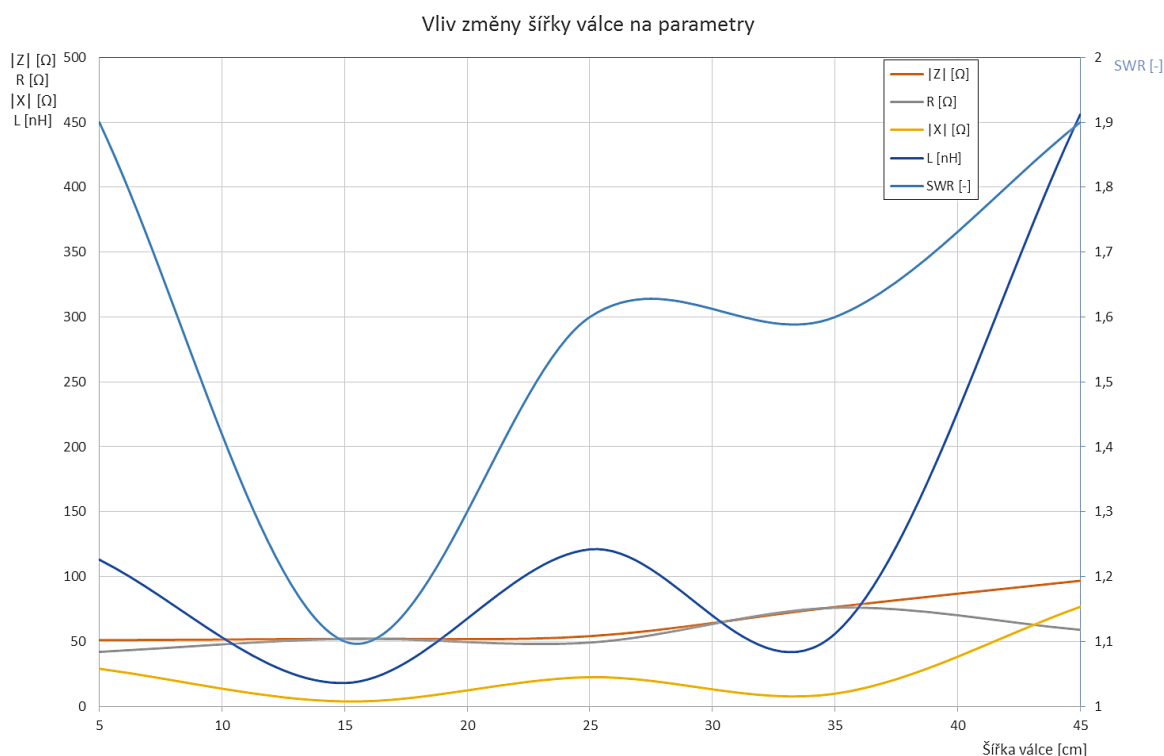


Obrázek 2.22: Změna šířky testovaného vzorku

Bylo provedeno celkem pět měření. Po každém měření bylo nutné rozebrat anténu a zkrátit šířku válce o 10 cm. Díky tomu, že po každém měření došlo k rozebrání a složení antény a tím pádem došlo i k nechtěné změně umístění vazební smyčky, je možné, že mohlo dojít k malým nepřesnostem, proto je nutné toto zohlednit.

Tabulka 2.4: Vliv změny šířky válce

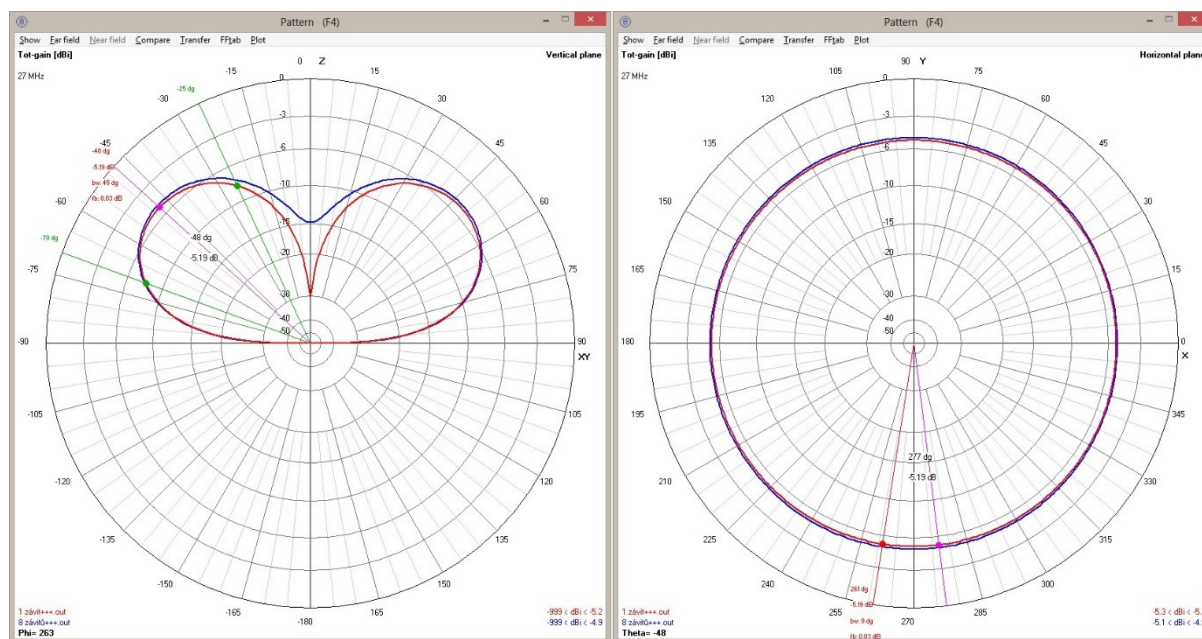
Šířka	f	SWR	Z	R	X	L	C
[cm]	[kHz]	[-]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[nH]	[pF]
45	26736	1,9	96,8	59,0	76,7	456	77
35	27968	1,6	76,6	76,0	9,8	56	577
25	29464	1,6	54,1	49,2	22,5	121	239
15	32544	1,1	52,1	52,0	3,8	18	1297
5	40888	1,9	51,0	42,0	29,0	113	133



Obrázek 2.23: Závislost šířky válce na parametrech

### c) Závěr:

Z tabulky a grafu je patrné, že každé zkrácení šířky hlavní smyčky má za následek zvýšení rezonančního kmitočtu. Hodnoty činitele stojatých vln se povedlo udržet do hodnoty 1,9, což je dobrý výsledek. Nejlepší hodnoty SWR bylo dosaženo u válce, který měl šířku pouhých 15 cm.



Obrázek 2.24: Vertikální (vlevo) a horizontální (vpravo) vyzářovací charakteristika při změně šířky hlavní smyčky

## 2.4 Závěry plynoucí z analýzy antény

Pro co nejpřesnější výsledné hodnoty bylo provedeno několik měření. Statisticky zpracované výsledky jsou zaznačeny v tabulce 2.5. Z tabulky je zřejmé, že anténa byla co nejlépe vyladěná a je přibližně rovna zadané frekvenci. Dále je patrné, že hodnota SWR dosahuje průměrné hodnoty 1,38, což je velice dobrý výsledek.

Tabulka 2.5: Průměrných naměřených hodnot

Počet měření	f	SWR	Z	R	X	L	C
[-]	[kHz]	[-]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[nH]	[pF]
1	26912	1,4	83,2	68	15,3	82	412
2	26912	1,3	76,6	62	13,3	83	436
3	26912	1,3	74,2	60	13,6	80	440
4	26912	1,5	86,3	67,5	14,5	83	425
5	26912	1,4	82,3	69	13,9	80	431
<b>Průměr:</b>	<b>26912</b>	<b>1,38</b>	<b>80,52</b>	<b>65,3</b>	<b>14,12</b>	<b>81,6</b>	<b>428,8</b>

Shrňme si závěry plynoucí z analýzy ploché magnetické smyčkové antény pro zadané parametry  $f_0 = 27$  MHz a poměr  $0,2 \lambda$ . V první řadě bylo nutné vypočítat základní parametry antény (délka hlavní a vazební smyčky).

Dále bylo potřebné sestavit navrženou anténu. Jako materiál pro hlavní smyčku byla zvolená stínicí tepelná fólie, pro vazební smyčku byl použit měděný vodič o průměru 2,5 mm.

Tabulka 2.6: Porovnání vypočtených a potřebných délek

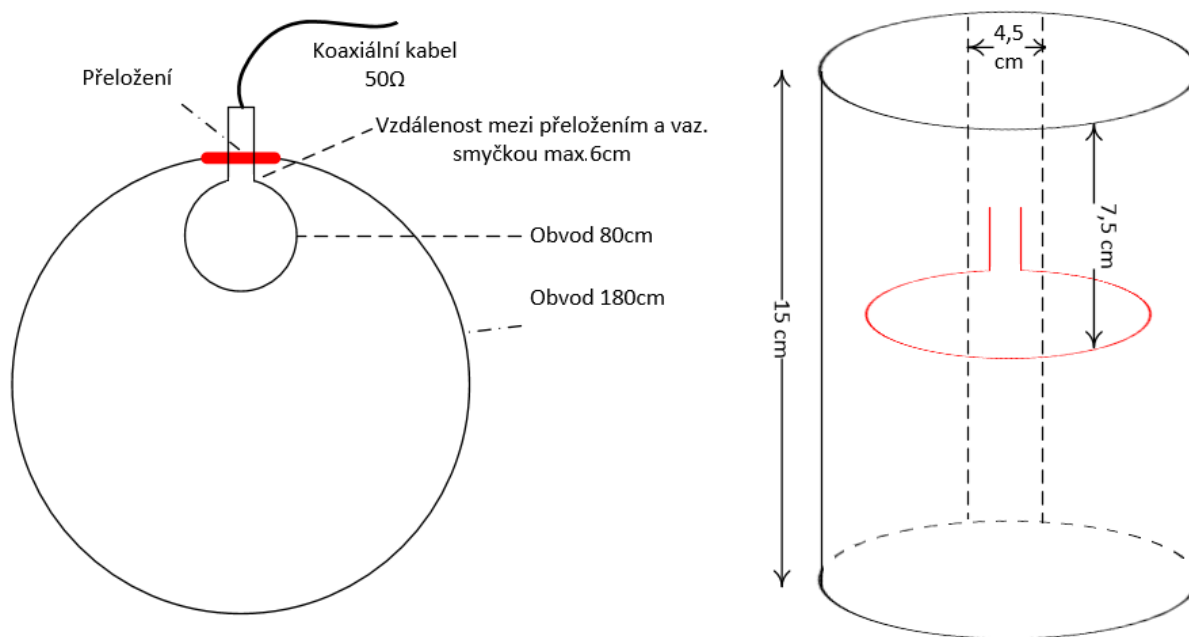
	Délka hlavní smyčky	Délka vaz. smyčky
Vypočtené parametry	2,2 m	0,4 m
Parametry v praxi	1,8 m	0,8 m

Tabulka 2.6 porovnává hodnotu vypočteného materiálu a skutečně použitého. Z toho vyplývá, že u hlavní smyčky je výhodné, když při teoretickém výpočtu vyjde délka o něco delší. Díky tomu se nemusíme bát, že by materiál chyběl. Naopak u vazební smyčky bylo v reálu potřeba o 100 % více materiálu, což ale není tak tragické, protože vazební smyčka se dá vytvořit z většiny vodivých materiálů.

Praktické rady získané experimenty při psaní této práce jsou: přeložení spoje hlavní smyčky by mělo být 4 - 5 cm. Vazební smyčka by měla být umístěna na straně přeložení (připomeňme, že u klasické MLA to bylo přesně na opačné straně) a to v polovině výšky válce. Vzdálenost mezi vazební smyčkou a přeložením by neměla být větší než 6 cm.

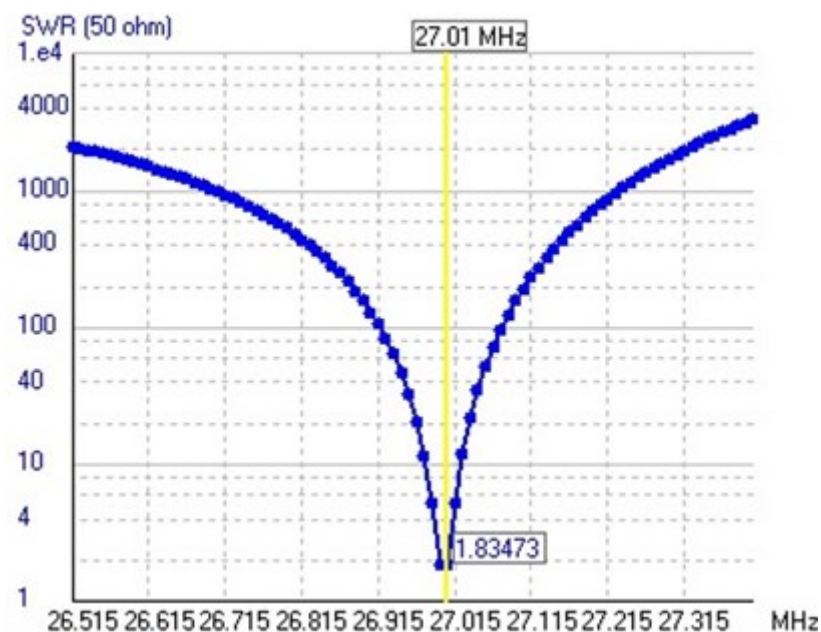
Na obrázku 2.25 jsou shrnuty veškeré parametry potřebné pro sestavení ploché magnetické smyčkové antény. Poznámka, rozdíl mezi horizontální a vertikální polarizací této antény je 20 dB.





Obrázek 2.25: Parametry potřebné pro sestavení antény pro 27 MHz

Pro finální verzi ploché magnetické smyčkové antény byl vytvořen v programu 4NEC2 model, kde je zobrazeno, jak se tato anténa chová v CB pásmu na kanálu C4, což je 27,005 MHz.



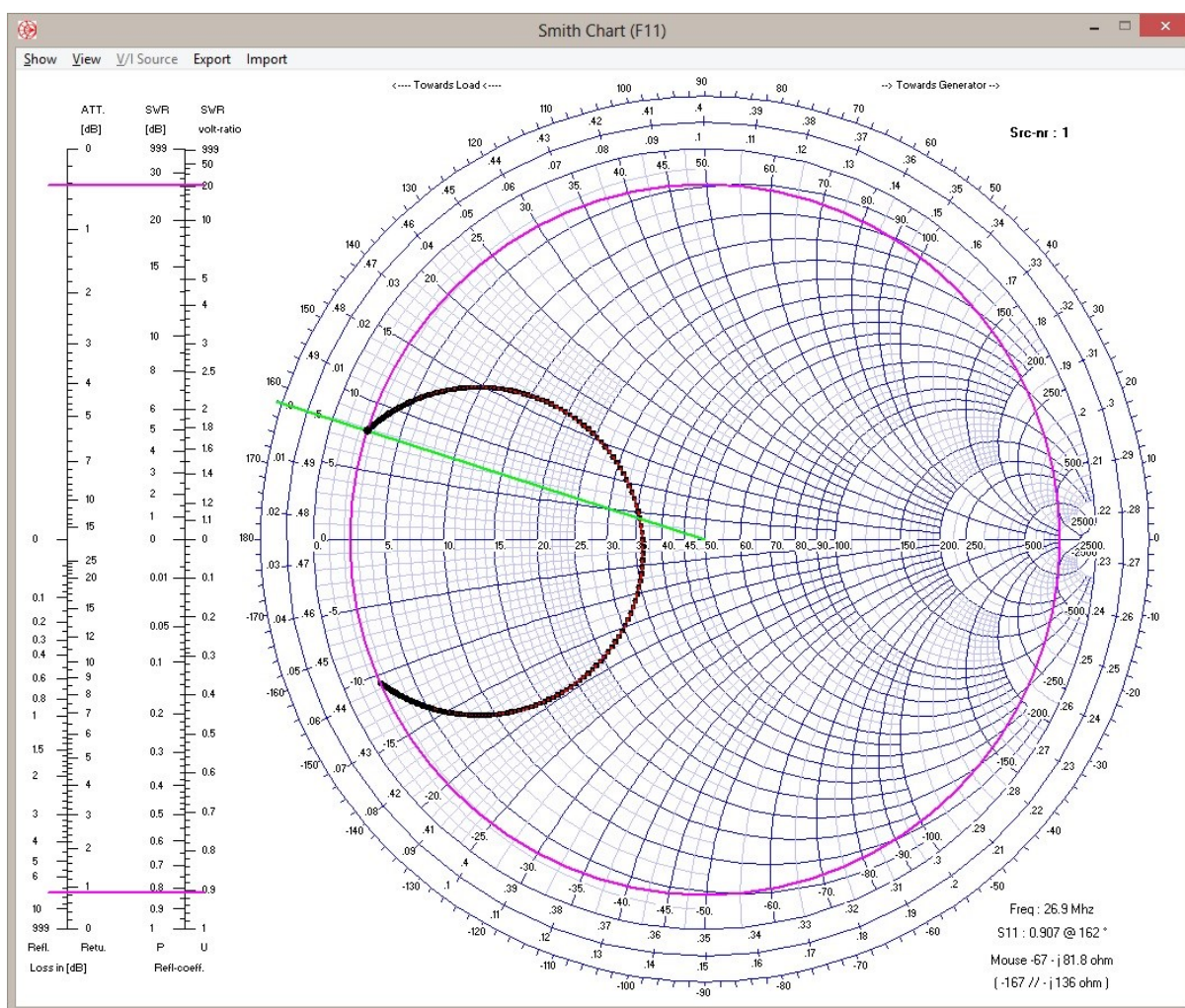
Obrázek 2.26: Frekvenční analýza (SWR) na CB pásmu pro kanál C4 (27,005 MHz)

Výsledná namodelovaná frekvenční analýza na obrázku 2.26 vyšla podle občanského pásma na kanál C4, který má frekvenci 27,005 MHz, protože dle zadání této práce má anténa pracovat na

frekvenci 27 MHz. Z výsledného grafu vidíme, že hodnota činitele stojatých vln vyšla 1,83, což je dobrý výsledek.

Na obrázku 2.27 je zobrazen Smithův diagram ploché magnetické smyčkové antény. Tento název vznikl podle inženýra Philipa H. Smitha, který ve třicátých letech minulého století odstranil levou půlku nekonečné plochy fázorového diagramu a pravou půlku nekonečného diagramu stočil do kruhu.

U Smithova diagramu se v podstatě jedná o "přidání další roviny s měřítkem" do dvourozměrného prostoru zobrazovacího grafického prostředí, např. papíru. Díky tomu je okamžitě vidět to, co při jiných metodách vyjádření je vidět až při logickém vyhodnocování z více kroků. Z obrázku 2.30 vidíme, že anténa má na rezonanční frekvenci ( $jX=0$ ), reálná impedance je  $36,5 \Omega$  a SWR je cca 1:1,37.



Obrázek 2.27: Smithův diagram ploché MLA

### Ověření vlastností antény pomocí vektorového obvodového analyzátoru

Tato část práce slouží pro ověření závěrů plynoucích z analýzy antény. Pro toto závěrečné (spíše ověřující) měření byl zvolen měřicí přístroj **SDR-Kits**. Základní parametry přístroje:

- kmitočtový rozsah: 1 kHz – 1,3 GHz
- dynamický rozsah: 90 dB
- měření vzdálenosti (TDR): 0 – 500 m
- podporovaná měření: činitel stojatých vln, impedance, indukčnost, kapacita, odpor, činitel jakosti, měření impulzní odezvy, spektrální analýza, měření trojbranů...

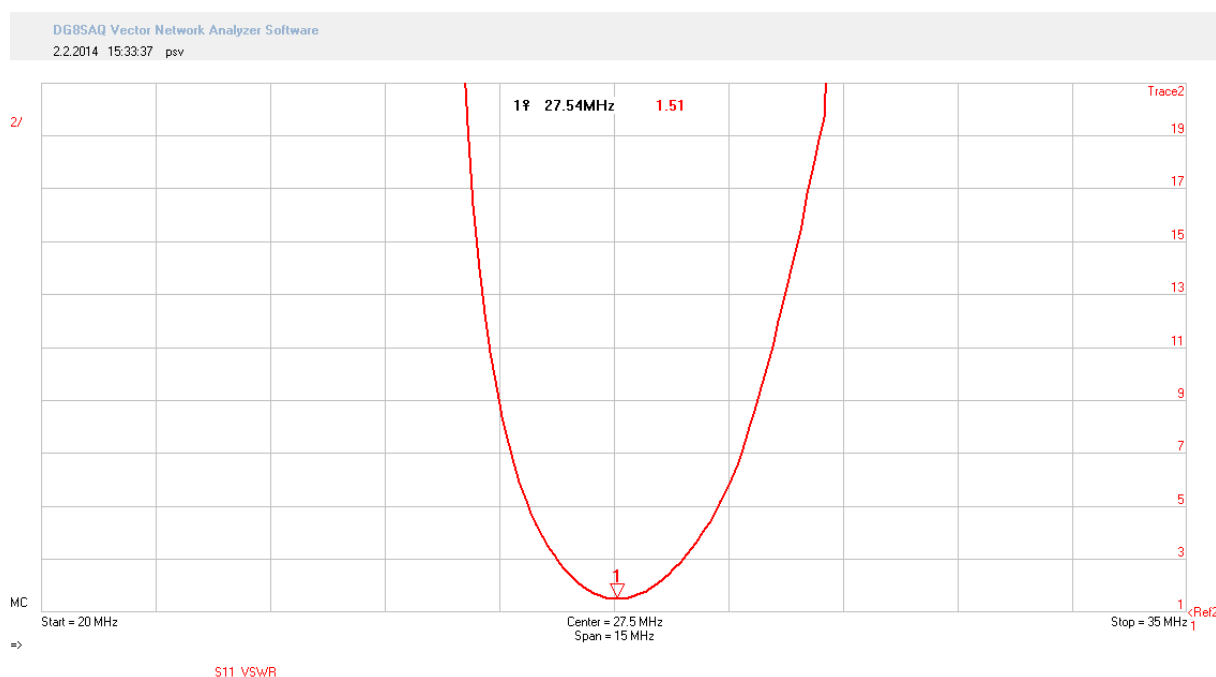
Měřicí přístroj sestává ze dvou desek plošných spojů, přičemž jádrem celého přístroje je deska s názvem **VNWA** [22], ta obsahuje veškeré nezbytné součástky pro chod přístroje. VNWA je primárně vektorový obvodový analyzátor (*angl. VNA – Vector Network Analyzer*), který je schopen měřit nejen odrazové parametry jednobranu (například měření SWR antén), ale i přenosové parametry dvoubranu (například filtr nebo zesilovač).

Analýzátor umožňuje aktuální měřený signál přímo vykreslovat na displej počítače. Díky tomu je možné upravovat parametry antény za chodu, kde se tyto změny přímo promítají na vykreslovaném grafu, např. SWR.

Parametry antény pro měření zůstávají shodné s předchozí kapitolou a z důvodu jednoznačnosti je shrnu ještě jednou:

- výška hlavní smyčky: 15 cm (vazební smyčka byla umístěna ve středu výšky hl. smyčky)
- obvod hl smyčky: 180 cm, vazební: 80 cm
- šířka přeložení hl. smyčky: 4,5 cm
- vzdálenost hlavní smyčky od vazební: 3 cm
- zadaná frekvence: 27 MHz

Z obrázku 2.28 vidíme, že hodnota činitele stojatých vln vyšla 1,51 a frekvence byla 27,54 MHz. Strmost činitele stojatých vln není úplně ideální a to z důvodu, že při měření byla využita stínicí tepelná fólie s pěnovým dielektrikem, u kterého se v zavěšeném stavu hůře pracovalo s přeložením konců hlavní smyčky a také se nedařilo docílit ideálního kruhu této hlavní smyčky.

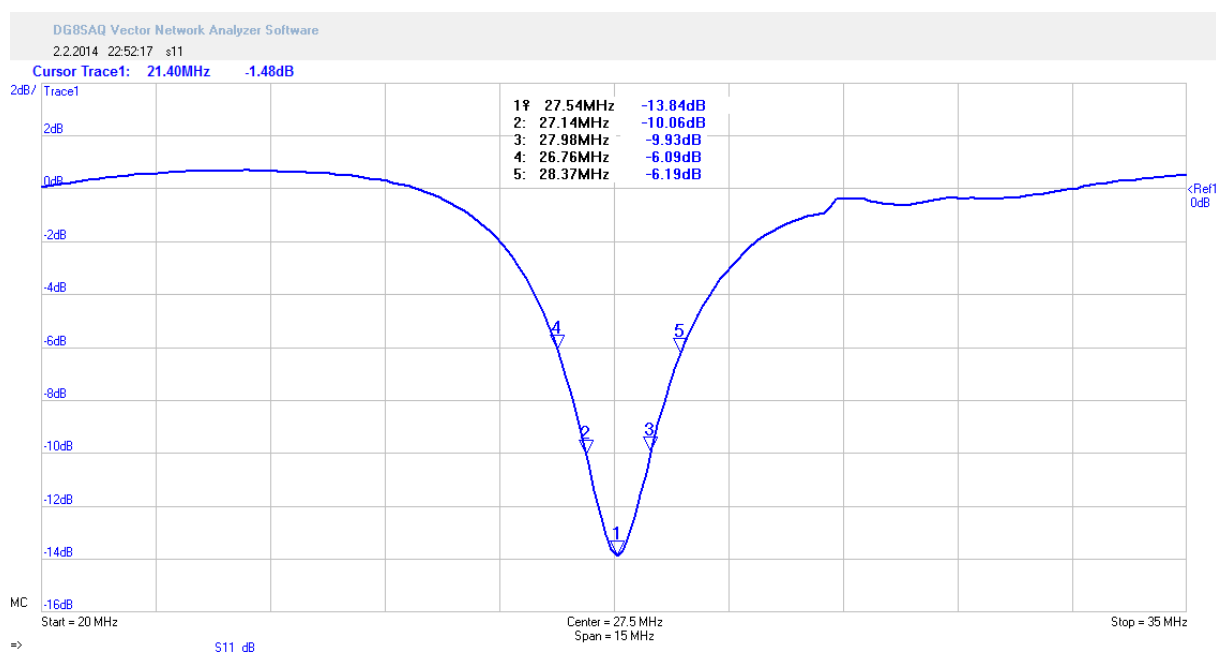


Obrázek 2.28: SWR optimalizovaného testovacího vzorku ploché MLA

Obvody, pracující na nízkých frekvencích, lze charakterizovat pomocí dobře známých parametrů, jako například Z, Y nebo H-parametrů [28, 29]. Na vyšších frekvencích by ovšem bylo použití těchto parametrů velmi obtížné nebo nemožné. K charakterizaci vysokofrekvenčních obvodů se proto používají s-parametry.

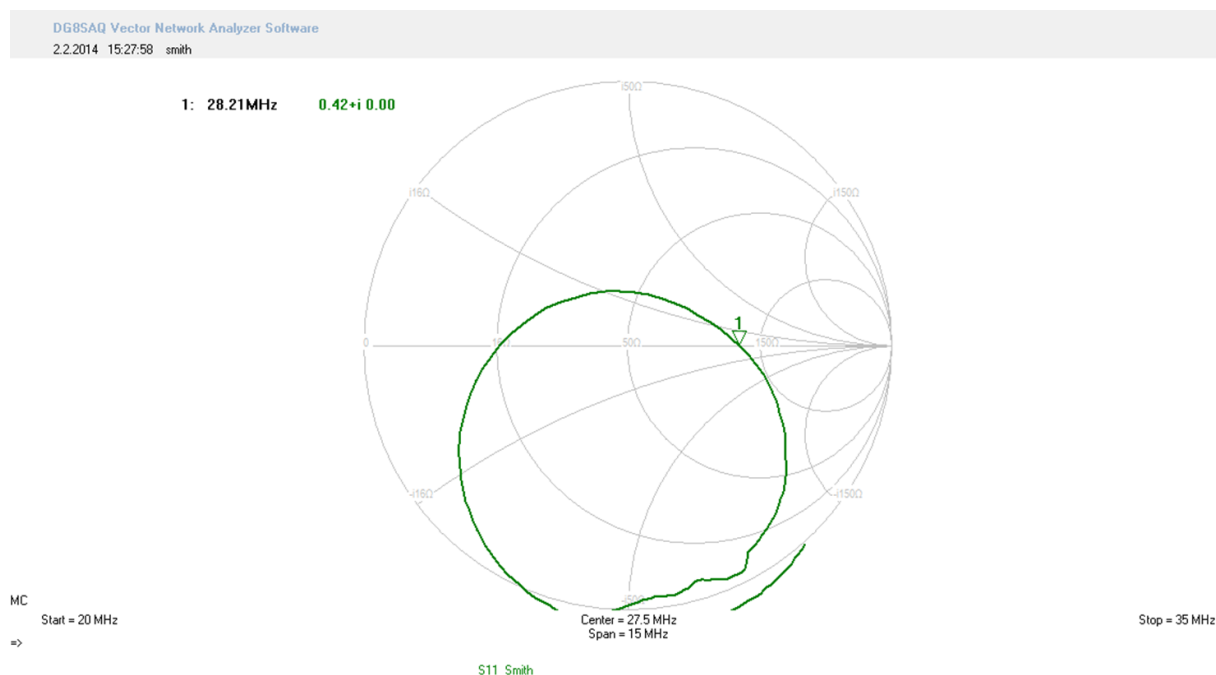
Parametr  $S_{11}$  nazvaný jako rozptylový parametr nám udává vstupní koeficient odrazu při výstupu zakončeném přizpůsobenou zátěží. Z obrázku 2.29 je patrné, že hodnota rozptylového parametru při frekvenci 27,54 MHz je -13,84 dB.

Výsledek měření ploché magnetické smyčkové antény ukazuje, že navržená anténa pokryje pásmo pracovního kmitočtu i v případě, že by byla podmínka impedančního přizpůsobení změněna na  $|S_{11}| \leq -6$  dB. V tomto by byla šířka pásma cca 1,8 MHz. Pokud by byly podmínky impedančního přizpůsobení ještě více zpřísněny na  $|S_{11}| \leq -10$  dB, pak by šířka pásma byla 1 MHz.



Obrázek 2.29: Rozptylový parametr ( $s_{11}$ ) ploché MLA

Obrázek 2.30 nám znázorňuje Smithův digram ploché MLA, vidíme, že anténa dosáhla rezonanční frekvence na 28,21 MHz a reálná impedance je 145  $\Omega$ . Pokud tyto hodnoty porovnáme se Smithovým diagramem, který byl nasimulovaný v programu 4NEC2, tak zjistíme, že při simulaci vyšla reálná impedance 36,5  $\Omega$ . Tento značný rozdíl hodnot impedance dokazuje (jak již bylo zmíněno), že simulace antén v různých programech je nutné brát s rezervou a je vhodnější je zjišťovat měřením.



Obrázek 2.30: Smithův diagram ploché MLA (VNA)

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo popsat základní princip funkce ploché magnetické smyčkové antény, dále ověřit vliv šířky hlavní smyčky antény na její vlastnosti, včetně vlivu umístění vazební smyčky na vlastnosti antény a výše zmíněné body ověřit měřením.

Práce je rozdělena do čtyř kapitol. Část nazvaná základní popis magnetické smyčkové antény obsahuje teoretický rozbor hlavní a vazební smyčky, včetně ladícího kondenzátoru. Dále jsou zde popsány elektronické parametry magnetické smyčkové antény. Nejpodstatnější kapitola této práce nese název plochá magnetická smyčková anténa. Tato část obsahuje kromě popisu antény a výpočtů, také její simulace, praktické sestavení a měření. Dále bylo na anténě prakticky ověřeno, co se stane, pokud použijí různé velikosti vazební smyčky, jaký má vliv umístění budícího obvodu, jak se dá na této anténě měnit kapacita a v neposlední řadě, co se děje s anténními parametry, pokud měním velikost válce tvořícího hlavní smyčku.

Plochá MLA je skvělá ukázka toho, že se smyčková anténa dá vytvořit vlastně z čehokoliv (v našem případě jsme k tomu použili stínící tepelnou fólii skládající se z hliníkové fólie a pěnového dielektrika). Výhodou této antény je její skladnost, dá se totiž velice lehce srolovat do tenkého válce, díky tomu je lehce přenosná.

Teoretické výpočty a simulace byly ověřeny praktickým měřením, které ukázalo, že výpočty je nutno brát pouze orientačně, protože se většinou s naměřenými hodnotami neshodují. I když značná míra neshod může být ovlivněna chybami měření, jako je např.: nemožnost umístit vazební smyčku na přesně stejné místo, hlavní smyčka netvoří ideální kruh atd.

Po řadě testů a měření byla zvolena optimální šířka hlavní smyčky 15 cm při obvodu 180 cm a materiálem tvořícím tuto hlavní smyčku byla stínící tepelná fólie s tenkou hliníkovou vrstvou. Přeložení konců hlavní smyčky bylo 4,5 cm a konce k sobě byly zafixovány oboustrannou lepicí páskou. Vazební smyčka této antény měla délku 80 cm, byla sestavena z měděného drátu o průměru 2,5 mm a byla zapuštěna ve středu hlavní smyčky. Vzdálenost těchto dvou smyček od sebe byla 4,5 cm. Tyto parametry platí pro zadanou frekvenci 27 MHz a poměr  $0,2 \lambda$ .

Jako jedno z možných využití této antény je použití v záchranných jednotkách. Pokud jim např. selžou všechny ostatní dostupné komunikační prostředky, je možné si plochou magnetickou smyčkovou anténou vyrobit například ze stínící tepelné fólie.

Neočekává se, že by došlo k „masovému“ nasazení této antény v praxi, protože existují různé smyčkové antény, které mají lepší parametry a výhodnější tvar (široký válec tvořící hlavní smyčku, ploché MLA, by hůře odolával povětrnostním vlivům).

V závěru této diplomové práce bych rád zmínil anténu typu MLA-BMIS. Tato anténa vznikla na základě výzkumu ploché magnetické smyčkové antény v průběhu řešení této diplomové práce. Jedná se o anténu, která má malý rozměr. Její vysokofrekvenční parametry jsou přesně definovány konstrukcí a nejsou závislé na použití protiváhy. Při běžně používaném řešení (použití náhražkového řešení protiváhy) bývají totiž prutové antény frekvenčně i ziskově velmi nestabilní. Na frekvencích BMIS je účinnost MLA sice o něco horší než je účinnost dominantně používaných vertikálních antén bez přizpůsobení, ale případnou ztrátu vůči těmto prutovým nedoladěným anténám, která se na frekvencích BMIS pohybuje mezi -5 až -10 dB, lze kompenzovat u MLA-BMIS integrovaným

zesilovačem [23]. Výhodou MLA je jejich malý rozměr, možnost doladit anténu přesně na požadovaný kmitočet přímo na místě instalace a možnost potlačit rušení signálu. Tato anténa se využívá pro letecké pásmo 120 MHz, kde se právě testuje pro použití v ultra lehkých letadlech a rogalech. Ukázka této antény se nachází v příloze.

---

## Použitá literatura

- [1] ANTÉNY: Antény a trocha teorie k nim. In: [online]. [cit. 2012-11-16]. Dostupné z: <http://www.cbdx.cz/clanek99-anteny-anteny-5.htm>
- [2] BALANIS, Constantine A. *Antennatheory: analysis and design*. 3rd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005, xvii, 1117 s. ISBN 978-0-471-66782-7.
- [3] DVORSKÝ, Marek. Magnetická anténa. [online]. Elektrevue, 2008. vyd. 2008. ISSN 1213-1539. Dostupné z: [http://www.btv.cz/media/produkty/mla/obecne/2008\\_10-1.pdf](http://www.btv.cz/media/produkty/mla/obecne/2008_10-1.pdf)
- [4] LUKÁČ, Jan. *Magnetická anténa*. 2010. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Dvorský, Marek.
- [5] LUKÁČ, Jan. *Magnetická anténa*. 2008. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Dvorský, Marek.
- [6] BURGER, Oldřich. Magnetické antény – MLA. [online]. Radioamatér, 2008 [cit. 2012-11-16]. Dostupné z: [http://www.btv.cz/media/produkty/mla/obecne/093\\_mla.pdf](http://www.btv.cz/media/produkty/mla/obecne/093_mla.pdf)
- [7] SMIRENINA, B.A. *Radiotechnická příručka*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955. ISBN 621.396.
- [8] DVORSKÝ, Marek. Laděná magnetická anténa. [online]. 1.7.2008, 7/2008 [cit. 2012-11-16]. Dostupné z: <http://www.btv.cz/media/produkty/mla/obecne/Dvorsky.pdf>
- [9] CAHA, Vladimír a Miroslav PROCHÁZKA. *Anteny*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956. ISBN 621.396.67.
- [10] MMANA-GAL basic & MMANA-GAL Pro [online]. [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: <http://hamsoft.ca/pages/mmana-gal.php>
- [11] 4nec2 [online]. [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: <http://www.qsl.net/4nec2/>
- [12] Smalltransmittingloopantennas. In: [online]. 2000 [cit. 2012-11-22]. Dostupné z: <http://www.dxzone.com>
- [13] BURGER, Oldřich. MLA potřetí. [online]. Radioamatér, 2009 [cit. 2012-11-16]. Dostupné z: [http://www.btv.cz/media/produkty/mla/obecne/2009-5-33\\_34.pdf](http://www.btv.cz/media/produkty/mla/obecne/2009-5-33_34.pdf)
- [14] DVORSKÝ, Marek. VŠB-TU OSTRAVA. *Vypocet parametru N-MLA*.
- [15] Trocha teorie o měření PSV (ČSV, SWR) na CB pásmu. In: [online]. [cit. 2013-02-06]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/cb16/psv.htm>
- [16] HART, Ted. Small, High - Efficiency Loop Antennas. [online]. [cit. 2012-11-16]. Dostupné z: [http://www.we0h.us/Amateur\\_Radio\\_stuff/Transmitting-Loops/High\\_Efficiency\\_Transmit\\_Loop.pdf](http://www.we0h.us/Amateur_Radio_stuff/Transmitting-Loops/High_Efficiency_Transmit_Loop.pdf)
- [17] VAVRA, Š. *Antény a šírenie elektromagnetických vln*. Bratislava. ISBN 80-050-0131-2.
- [18] Občanské vysílačky: z pohledu jejich využití pro dobrodruhy a aktivně žijící lidi. [online]. 2006 [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: <http://www.adamek.cz/clanky/popularne-odborne-obcanske-vysilacky/>
- [19] PROCHÁZKA, Miroslav. *Antény: encyklopedická příručka*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-166-7.



- 
- [20] MATUSZCZYK, Jacek. *Antény prakticky*. 3. české vyd. Praha: BEN, 2005, 239 s. ISBN 80-730-0178-0.
- [21] RigExpert AA-230PRO - NOVINKA [online]. [cit. 2013-12-26]. Dostupné z: <http://www.empos.cz/attachments/1/1652c4a7b2f393706f3f1219bb07b05d.pdf>
- [22] BÍLEK, Jan. VNWA – víceúčelový VF měřicí přístroj. 2010, s. 16.
- [23] BURGER, Oldřich. Magnetická smyčková anténa MLA-BMIS-(RXZ) pro použití v systémech BMIS. s. 2.
- [24] IKRÉNYI, Imrich. *Amatérské krátkovlnové antény*. 2. vyd. Bratislava, 1972. ISBN 624.396.67.
- [25] Šíření elektromagnetických vln: Smithův diagram. [online]. s. 11 [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEl/sireni\\_vln/teze/otazka\\_05.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEl/sireni_vln/teze/otazka_05.pdf)
- [26] PROKEŠ, Aleš. *Rádiové přijímače a vysílače: přednášky*. 1. vyd. Brno: VUT FEKT, 2003, 174 s. ISBN 80-214-2263-7.
- [27] ŽALUD, Václav. *Moderní radioelektronika*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2000, 653 s. ISBN 80-860-5647-3.
- [28] S-parametry. PROCHÁZKA, Tomáš a Zdeněk BARTOŇ. ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY, FEKT VUT. [online]. [cit. 2014-02-04]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02029/index.html>
- [29] VELIČKA, Pavel a Zbyněk RAIDA. Elektrorevue: Širokopásmová dipólová anténa s drážkovaným reflektorem. 2013, roč. 15, č. 5, s. 5. DOI: ISSN1213-1539.

---

## Seznam příloh

Příloha.A:	Fotografie pracoviště .....	I
Příloha.B:	Fotografie pracoviště (detail) .....	II
Příloha.C:	Porovnání: SWR budící smyčky pro délku 44 cm .....	III
Příloha.D:	Porovnání: SWR budící smyčky pro délku 100 cm .....	IV
Příloha.E:	Graf průběhu X, R, Z.....	V
Příloha.F:	Závislost vlivu budící smyčky na parametrech.....	VI
Příloha.G:	Závislost šířky válce na parametrech .....	VII
Příloha.H:	Horizontální a 3D charakteristika ploché MLA .....	VIII
Příloha.I:	Citlivost na polarizovanou vlnu .....	IX
Příloha.J:	Vyzařovací charakteristika při změně velikosti vazební smyčky .....	X
Příloha.K:	Vyzařovací charakteristika při změně umístění vazební smyčky .....	XI
Příloha.L:	Vyzařovací charakteristika při změně kapacity .....	XII
Příloha.M:	Vyzařovací charakteristika při změně šířky hlavní smyčky .....	XIII
Příloha.N:	SWR optimalizovaného testovacího vzorku ploché MLA (VNWA) .....	XIV
Příloha.O:	Rozptylový parametr ( $s_{11}$ ) ploché MLA (VNWA) .....	XV
Příloha.P:	Charakter. reálné a imag. impedance a fáze rozptylového parametru (VNWA) .....	XVI
Příloha.Q:	Smithův diagram ploché MLA (VNWA) .....	XVII
Příloha.R:	Frekvenční analýza na pásmu 26 - 28 MHz .....	XVIII
Příloha.S:	Frekvenční analýza na CB pásmu.....	XIX
Příloha.T:	Vertikální charakteristika ploché MLA .....	XX
Příloha.U:	Frekvenční analýza (SWR) na CB pásmu .....	XXI
Příloha.V:	Smithův diagram ploché MLA .....	XXII
Příloha.W:	Ukázka MLA-H (MLA-BMIS) .....	XXIII

Součástí BP/DP je CD/DVD.

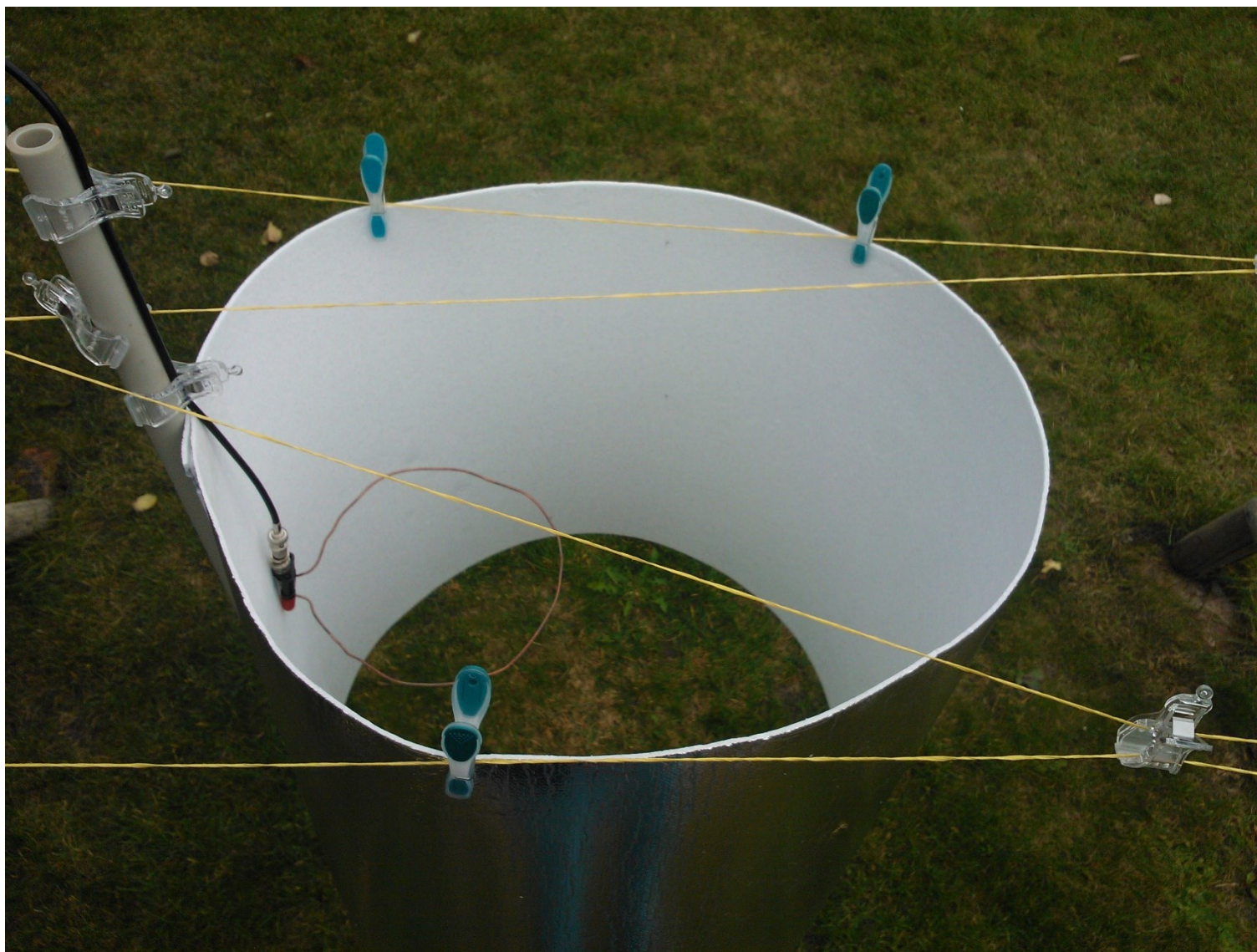
---

*Příloha.A: Fotografie pracoviště*

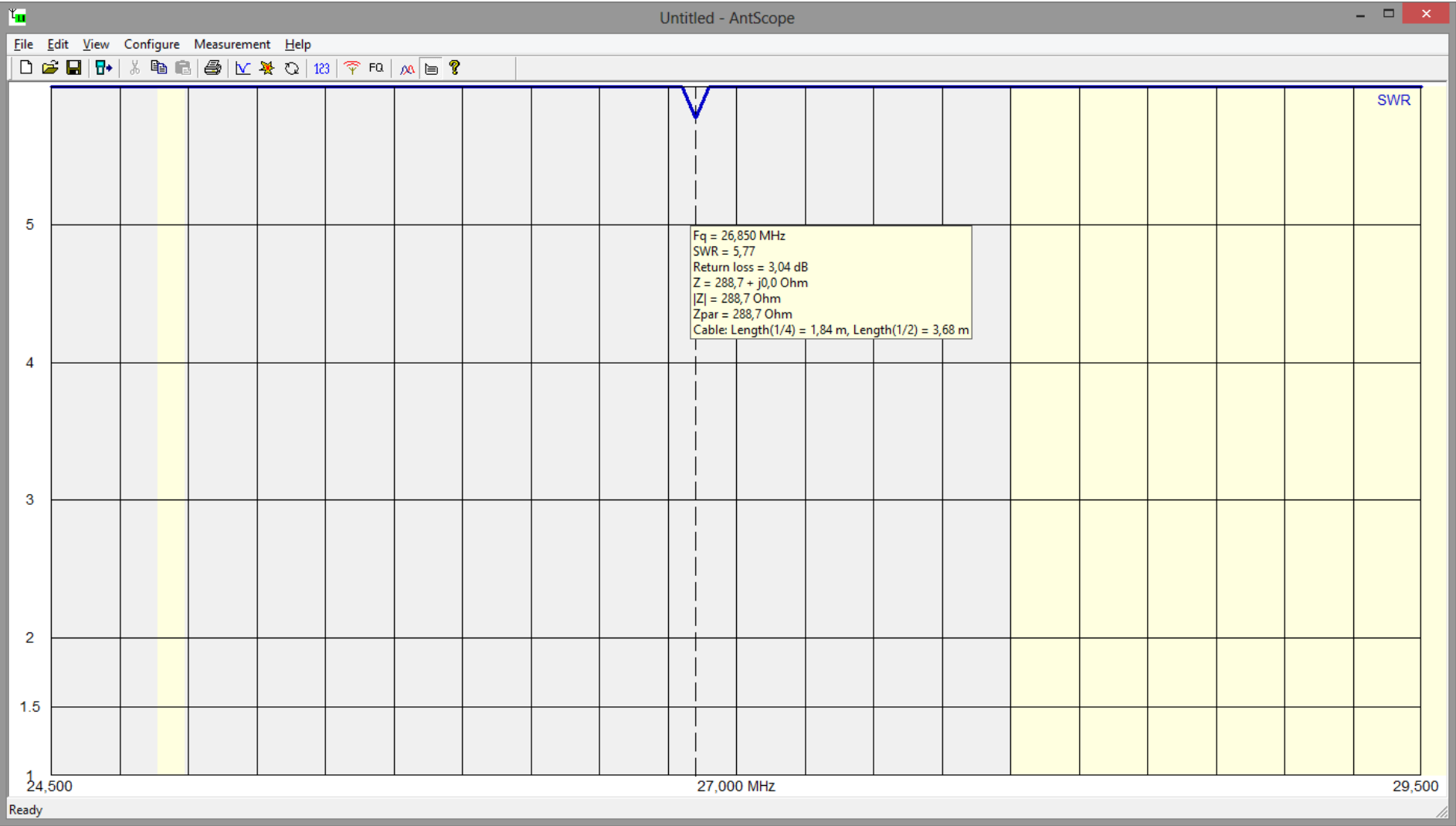




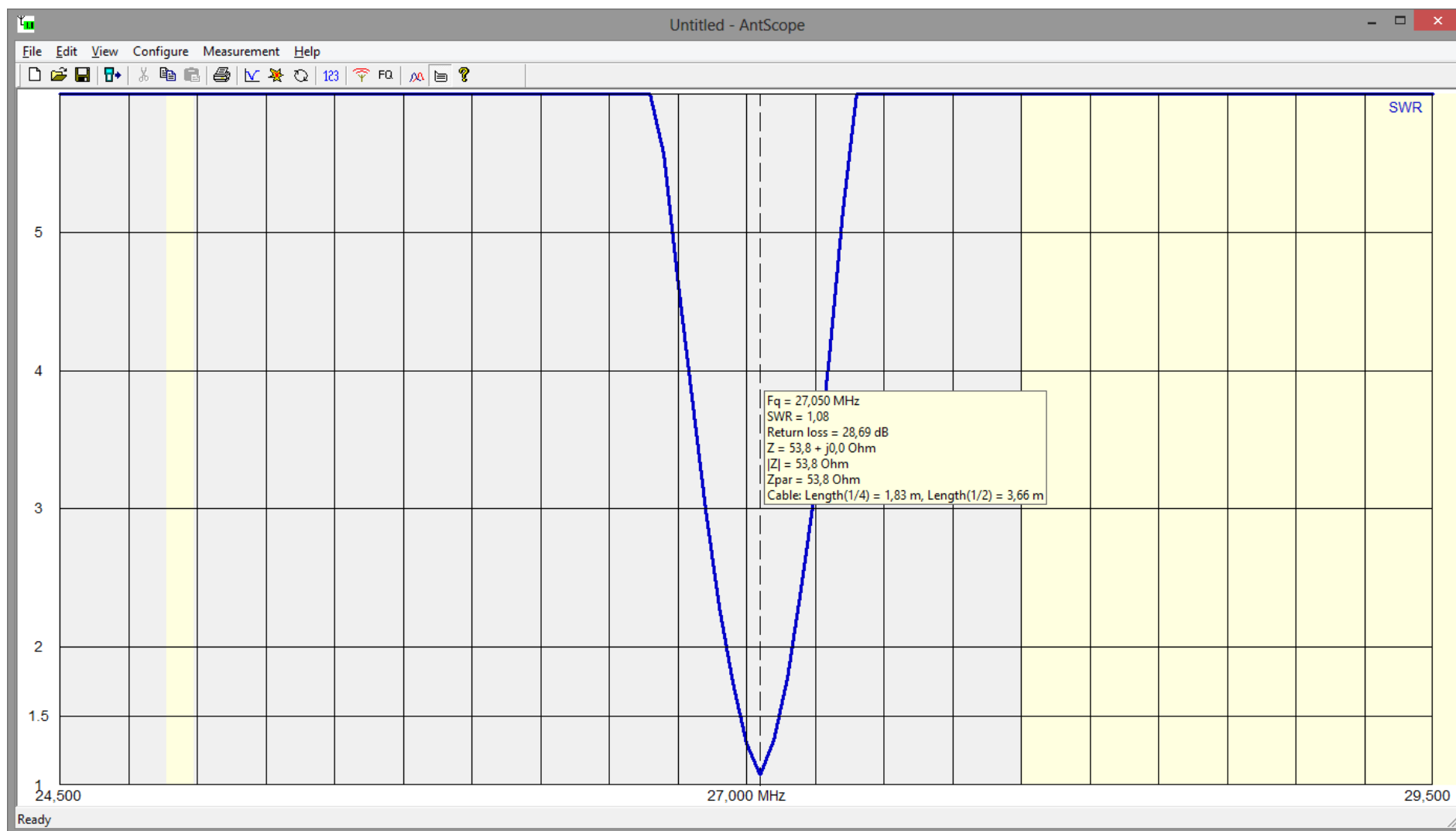
*Příloha.B: Fotografie pracoviště (detail)*



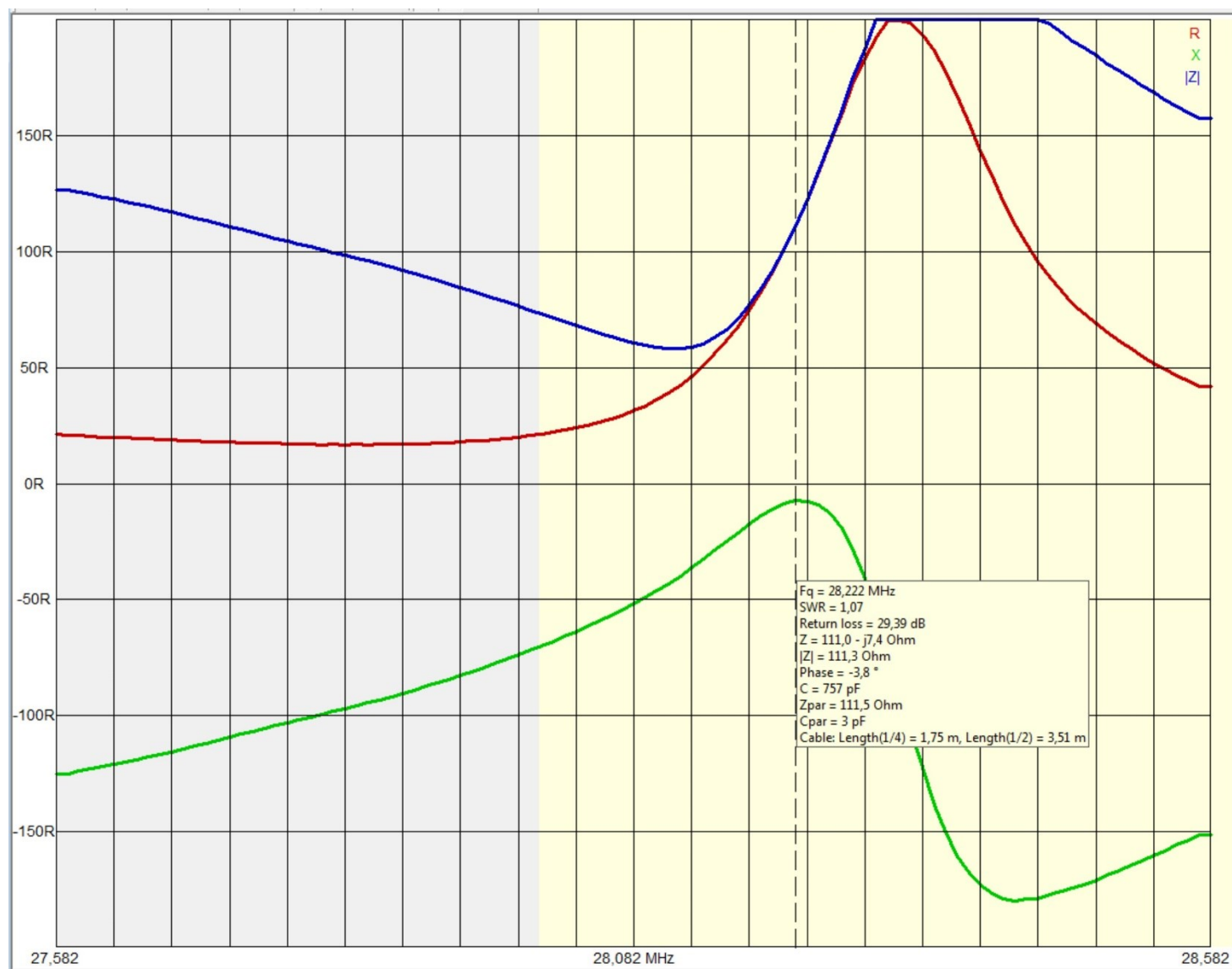
*Příloha.C: Porovnání: SWR budící smyčky pro délku 44 cm*

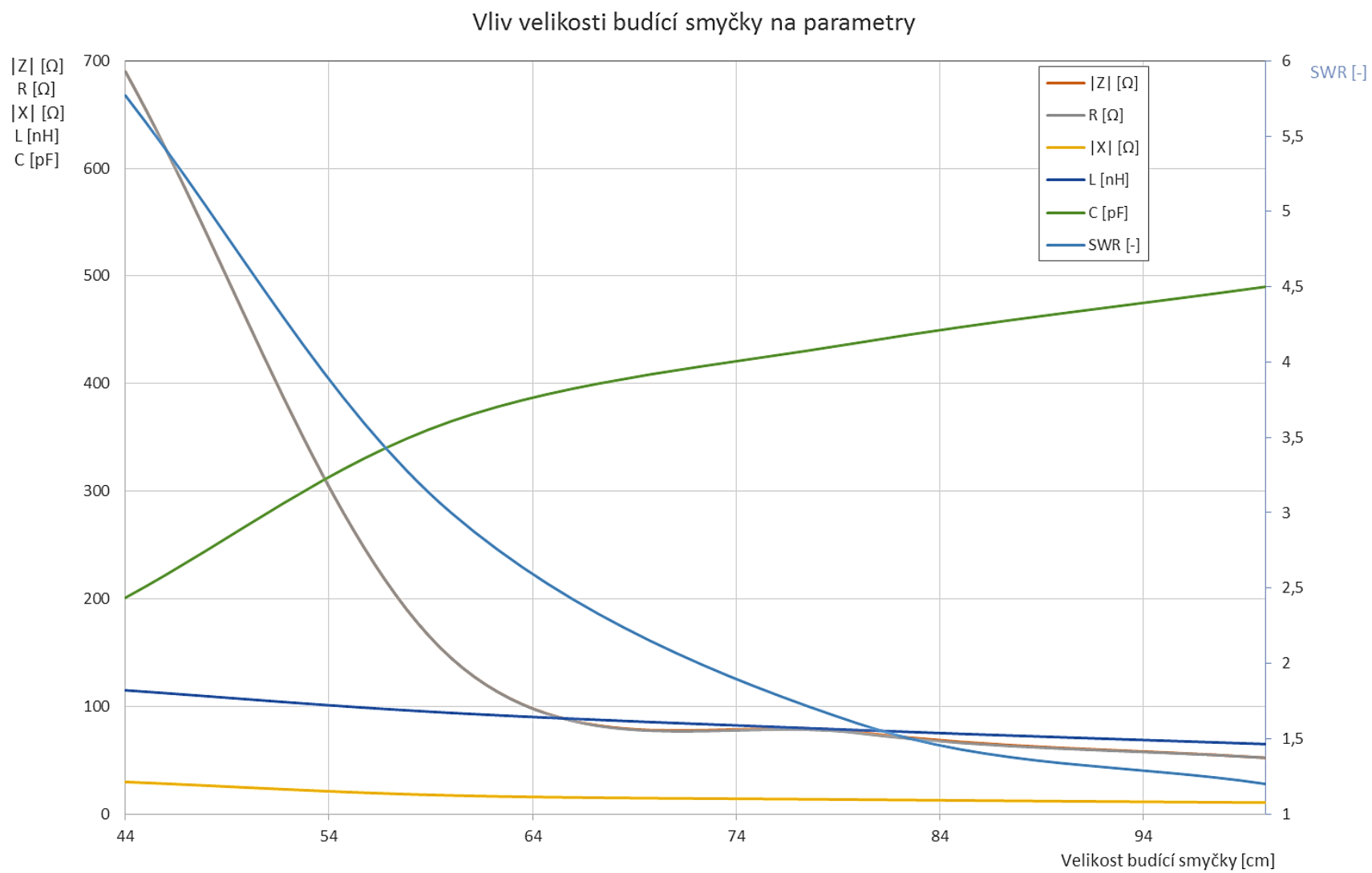


Příloha.D: Porovnání: SWR budící smyčky pro délku 100 cm

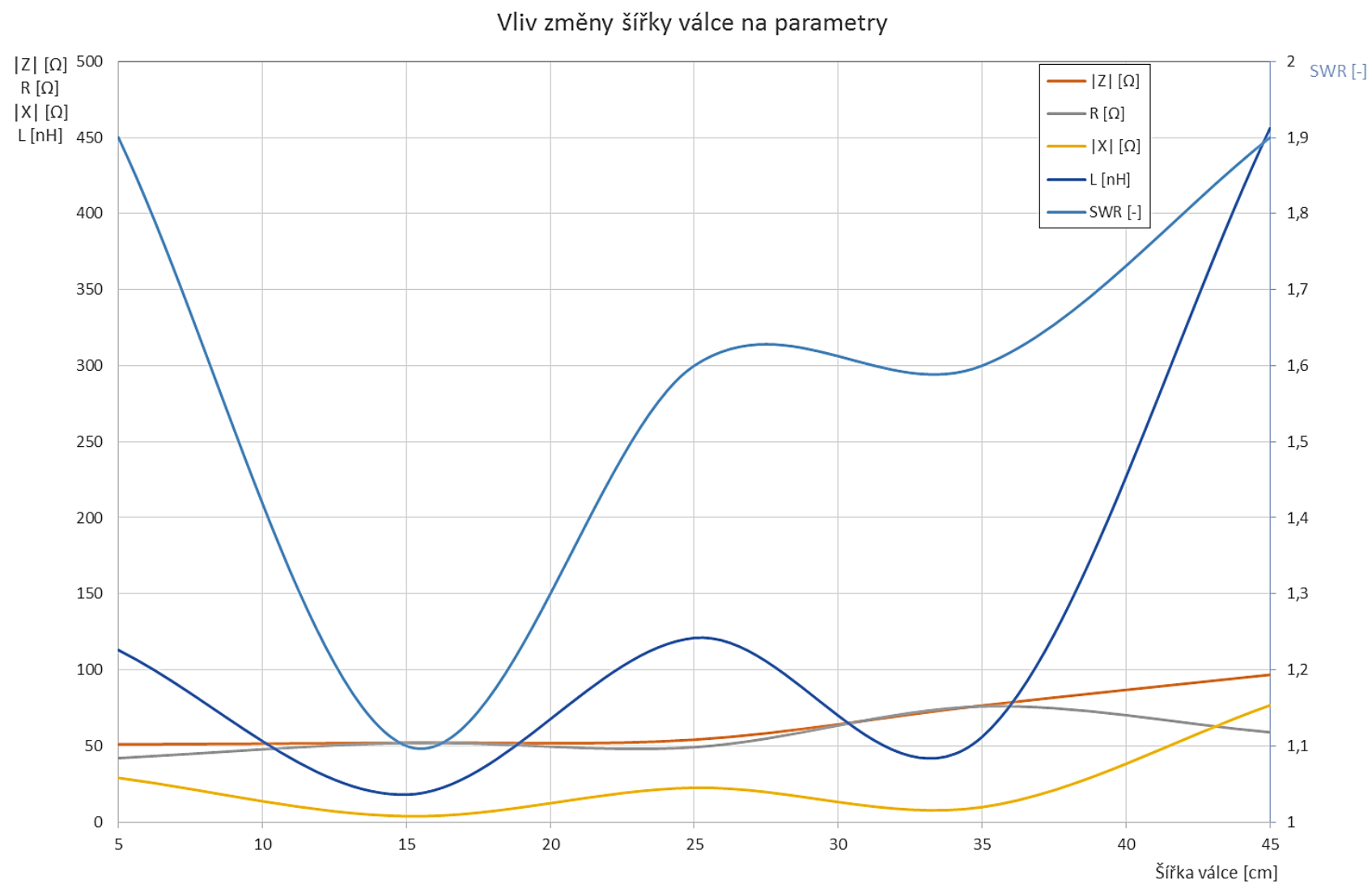


Příloha.E: Graf průběhu  $X$ ,  $R$ ,  $Z$

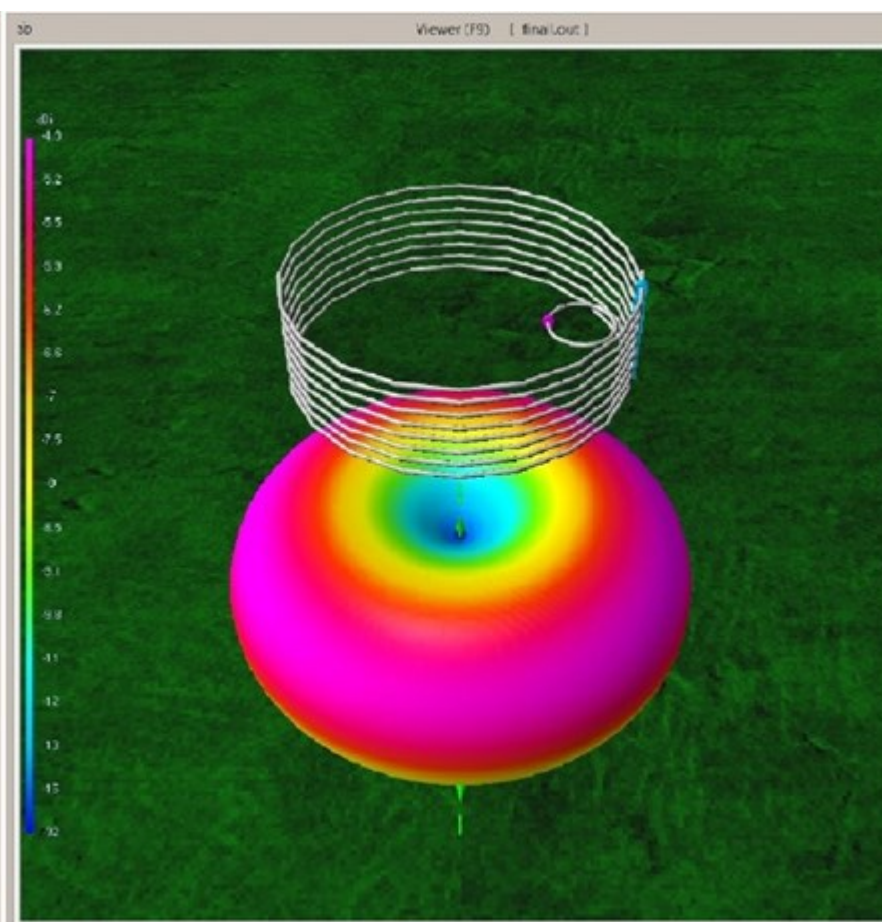
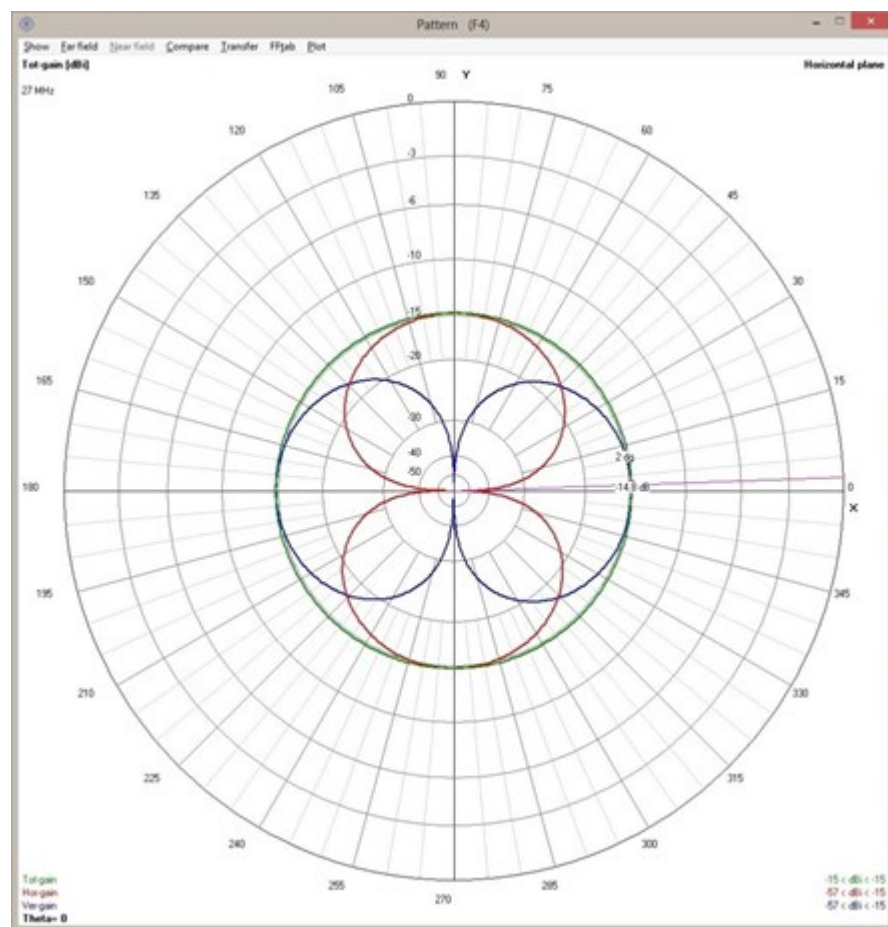




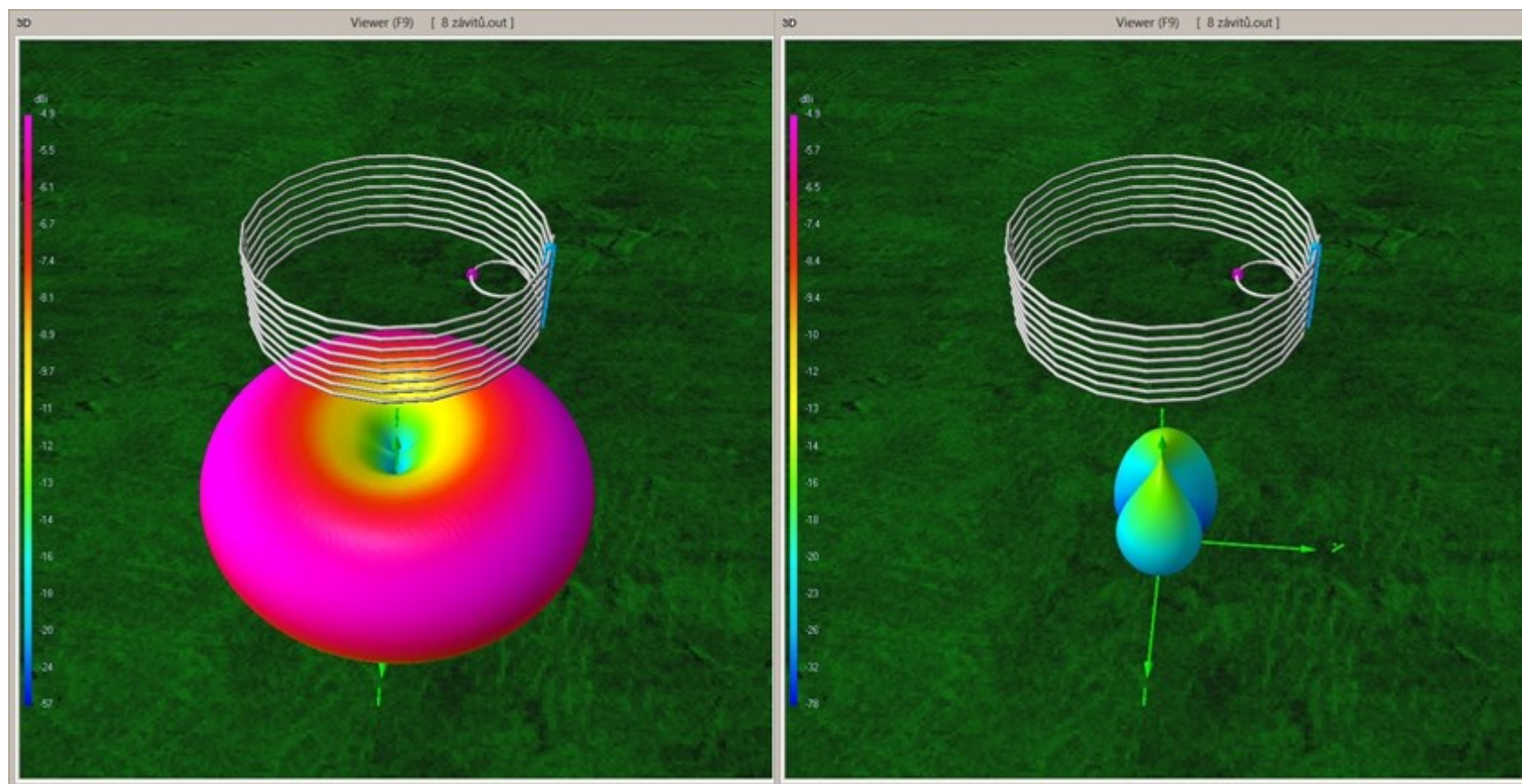




*Príloha.H: Horizontálna a 3D charakteristika ploché MLA*



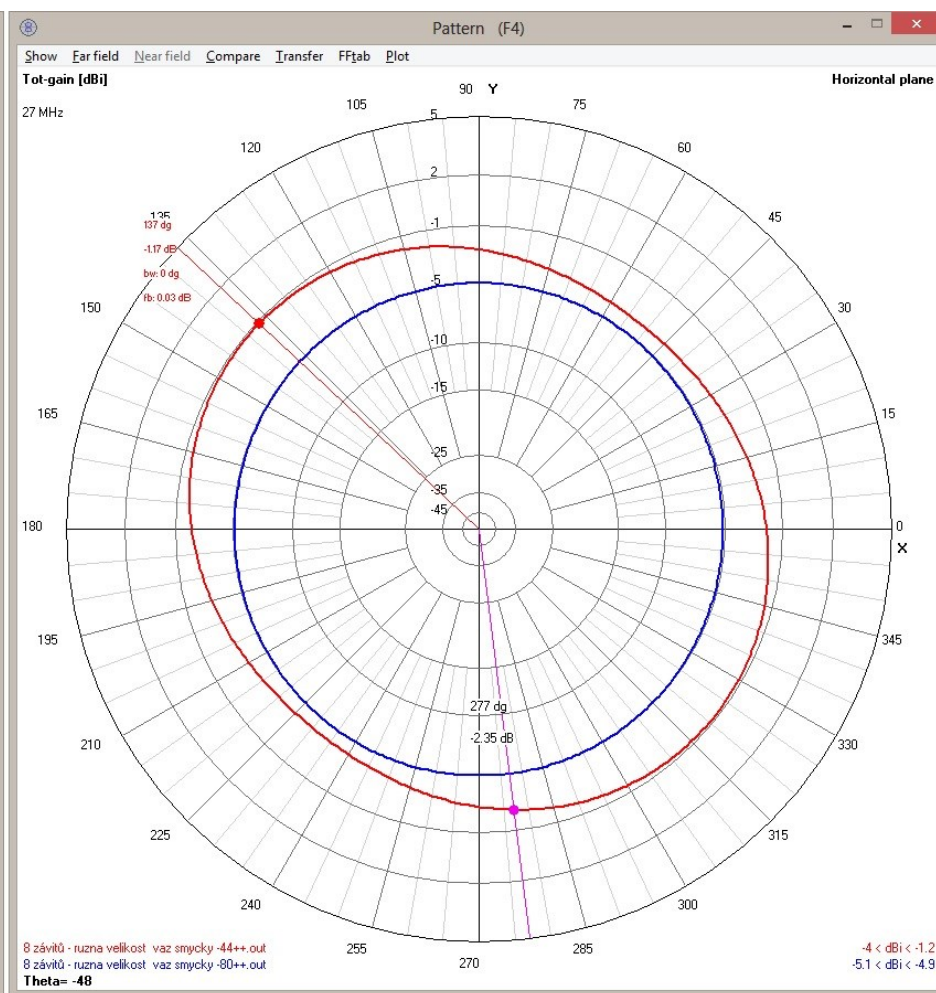
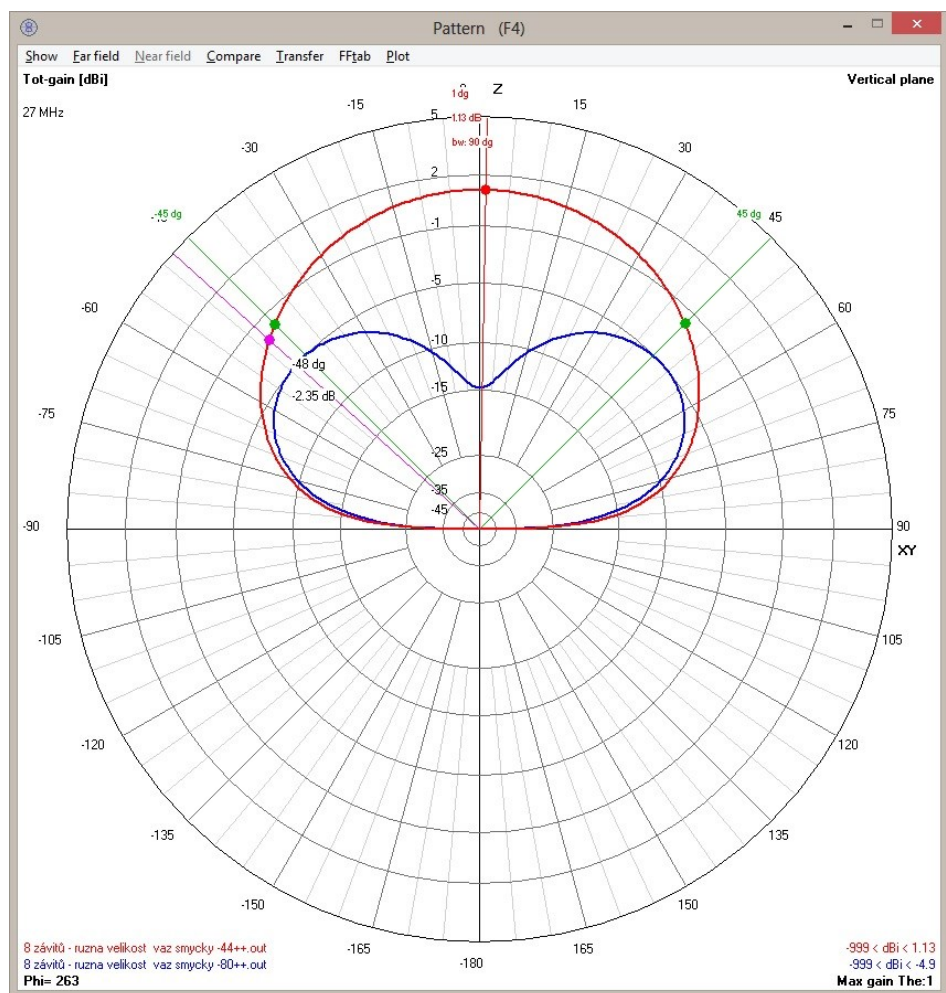
*Příloha.I: Citlivost na polarizovanou vlnu*



Horizontální (vlevo) a vertikální (vpravo) 3D model

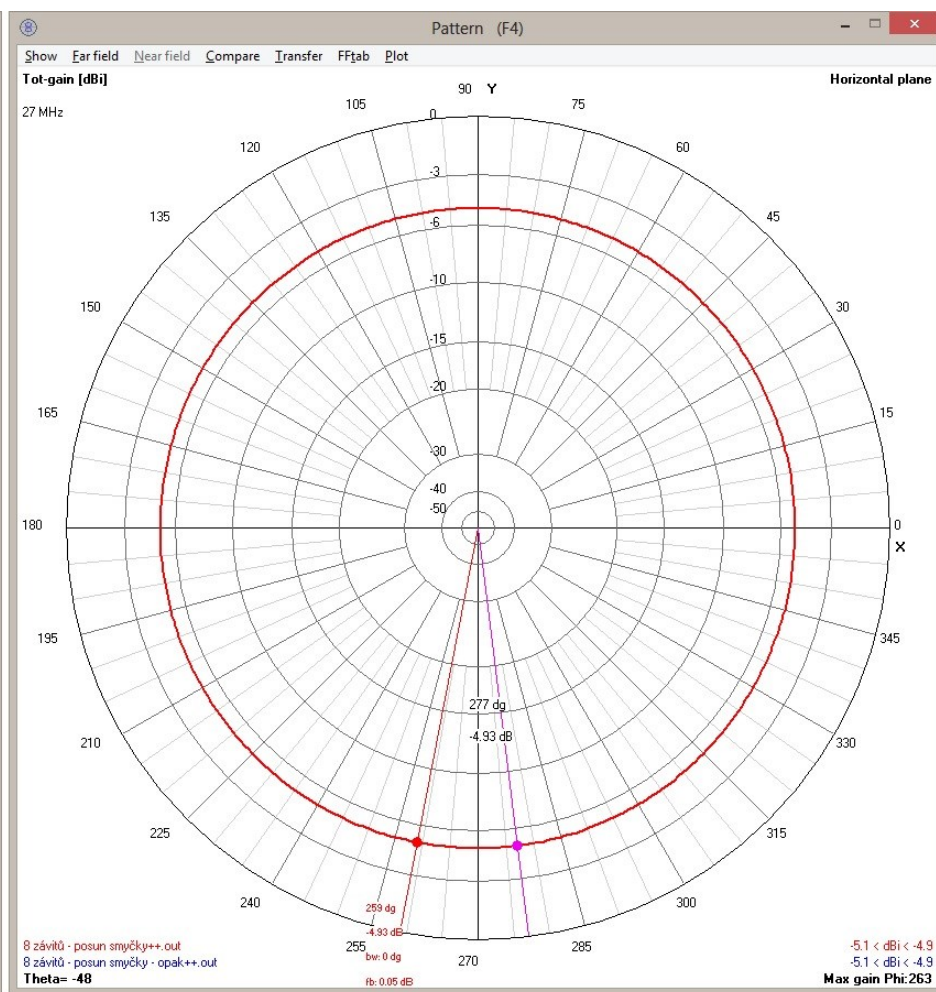
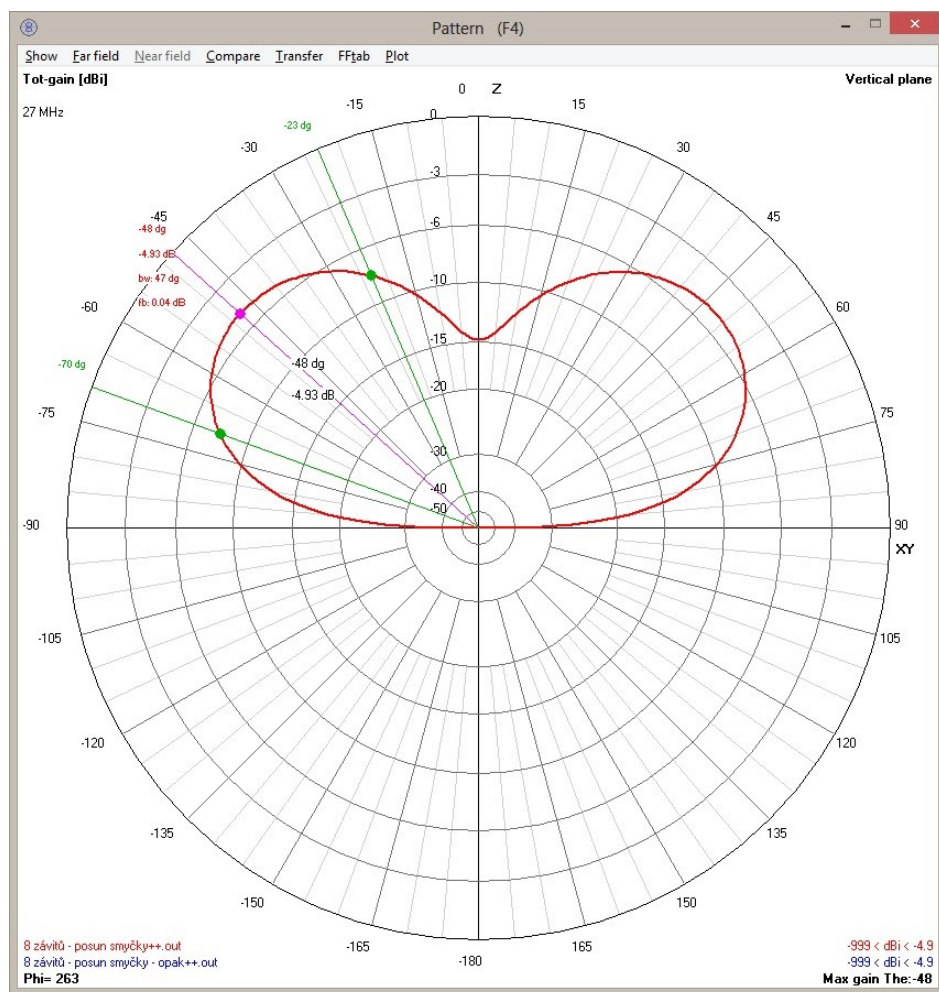


*Příloha.J: Vyzařovací charakteristika při změně velikosti vazební smyčky*



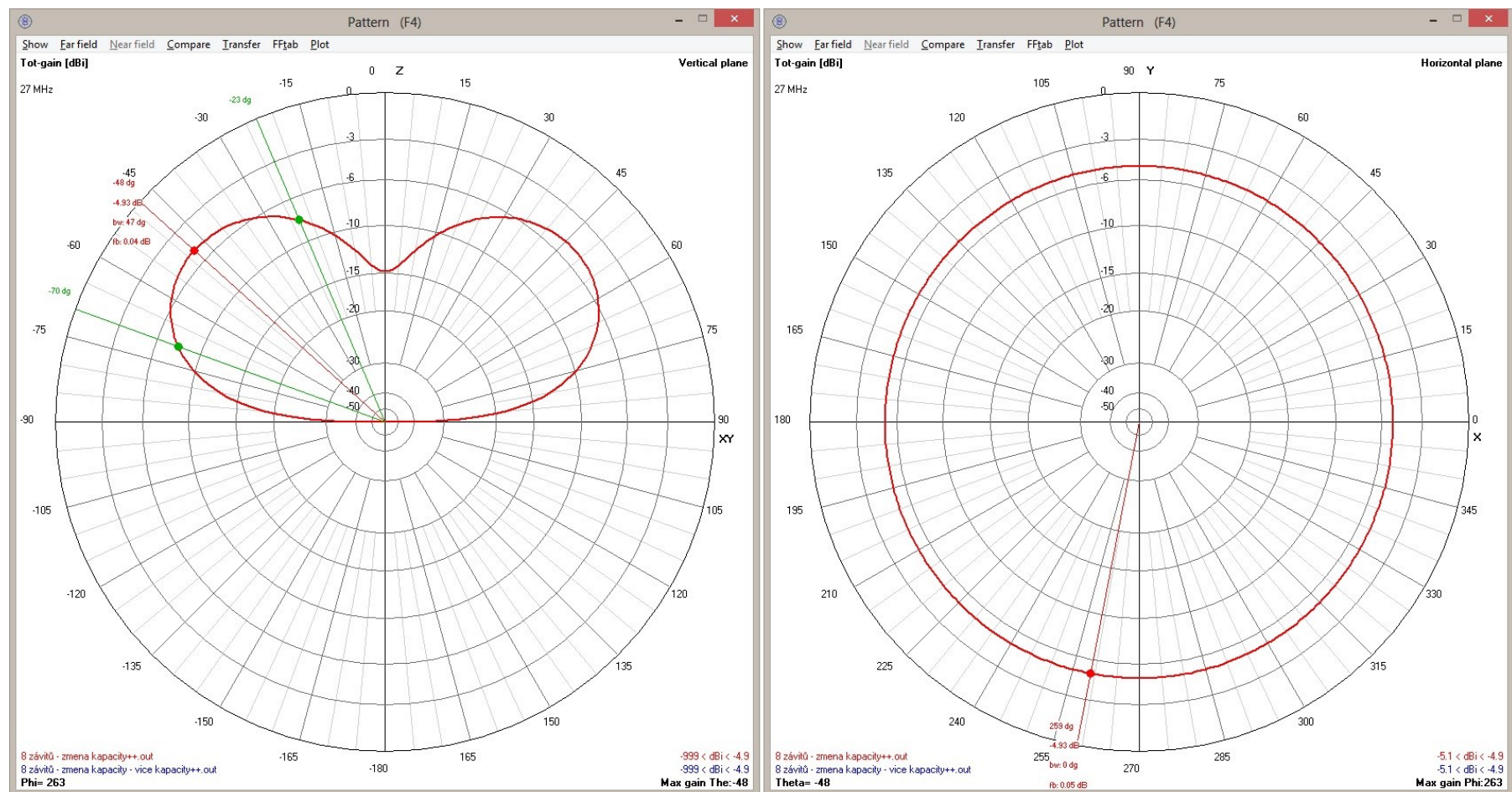
Vertikální (vlevo) a horizontální (vpravo) charakteristika

*Príloha.K: Vyzařovací charakteristika při změně umístění vazební smyčky*



### Vertikální (vlevo) a horizontální (vpravo) charakteristika

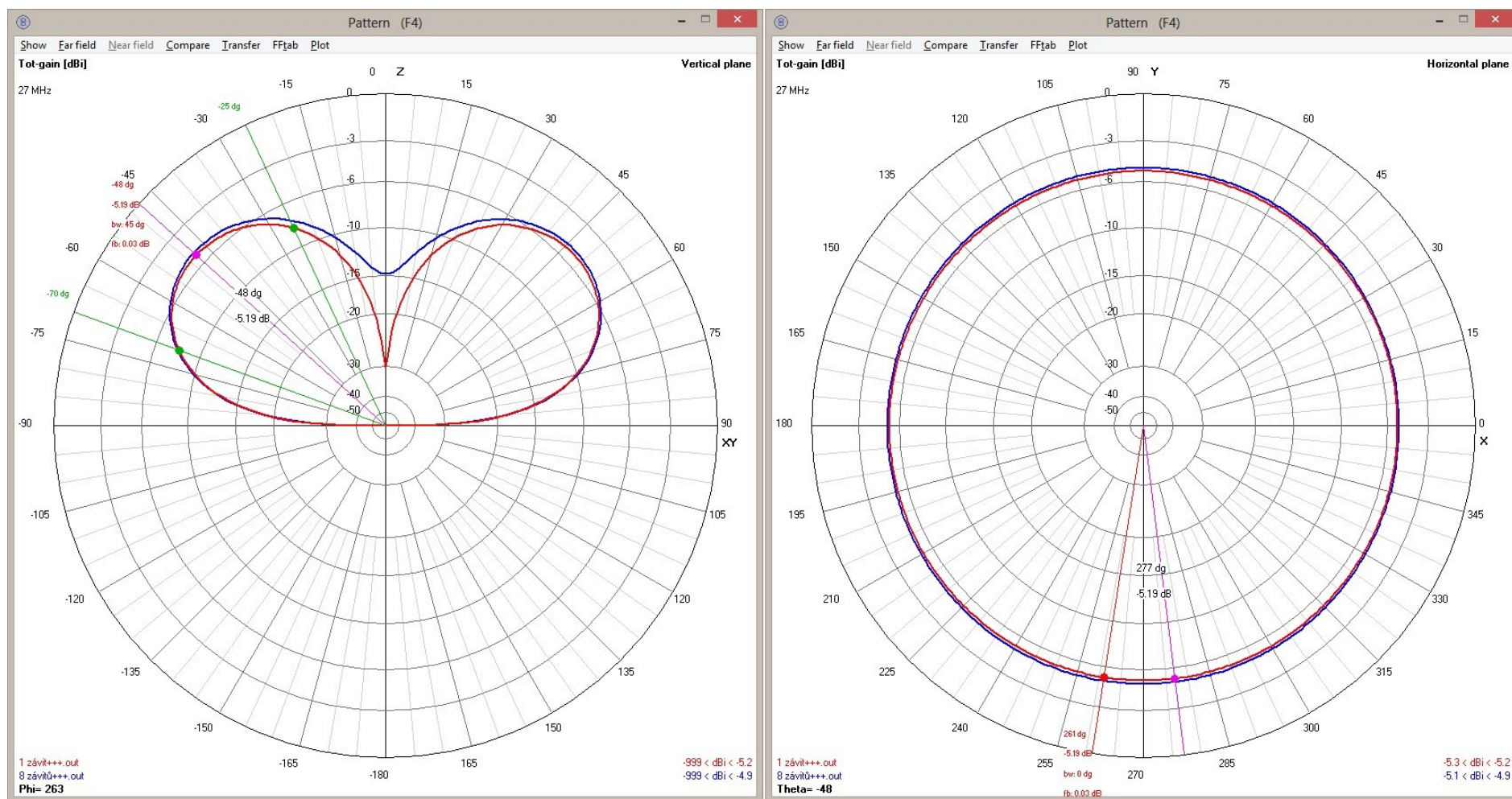
*Příloha.L: Vyzařovací charakteristika při změně kapacity*



Vertikální (vlevo) a horizontální (vpravo) charakteristika

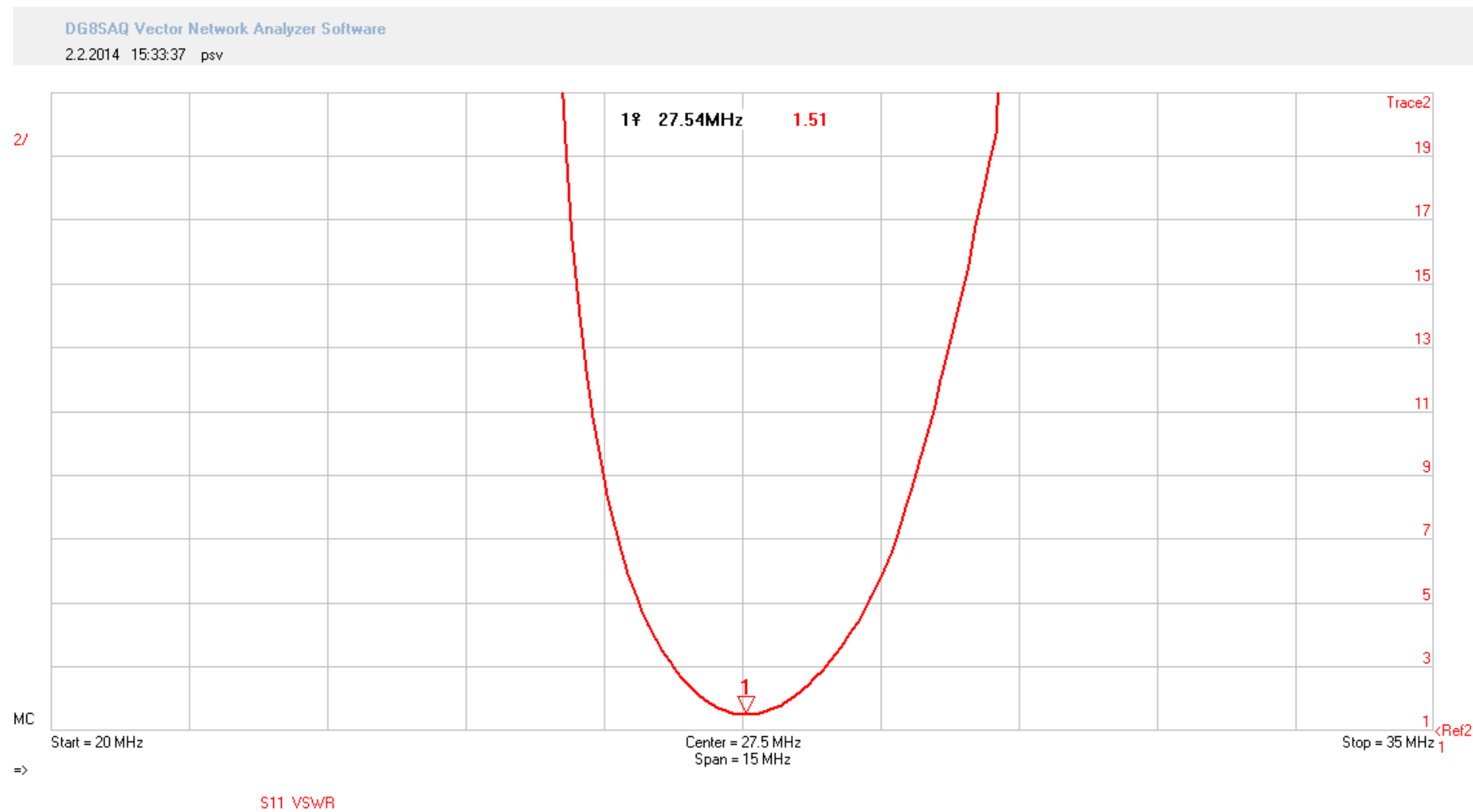


*Příloha.M: Vyzařovací charakteristika při změně šířky hlavní smyčky*



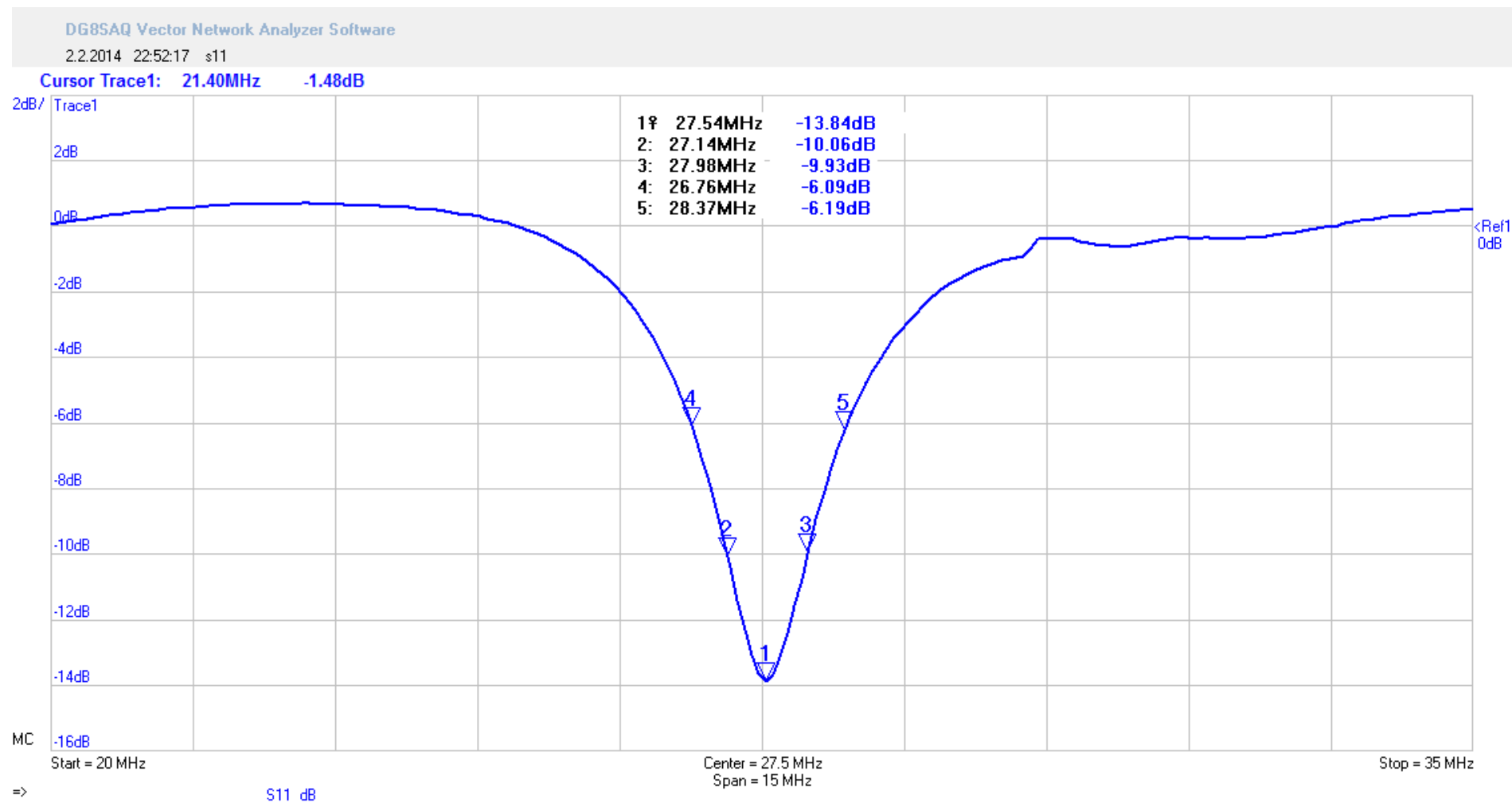
Vertikální (vlevo) a horizontální (vpravo) charakteristika

Příloha.N: SWR optimalizovaného testovacího vzorku ploché MLA (VNWA)

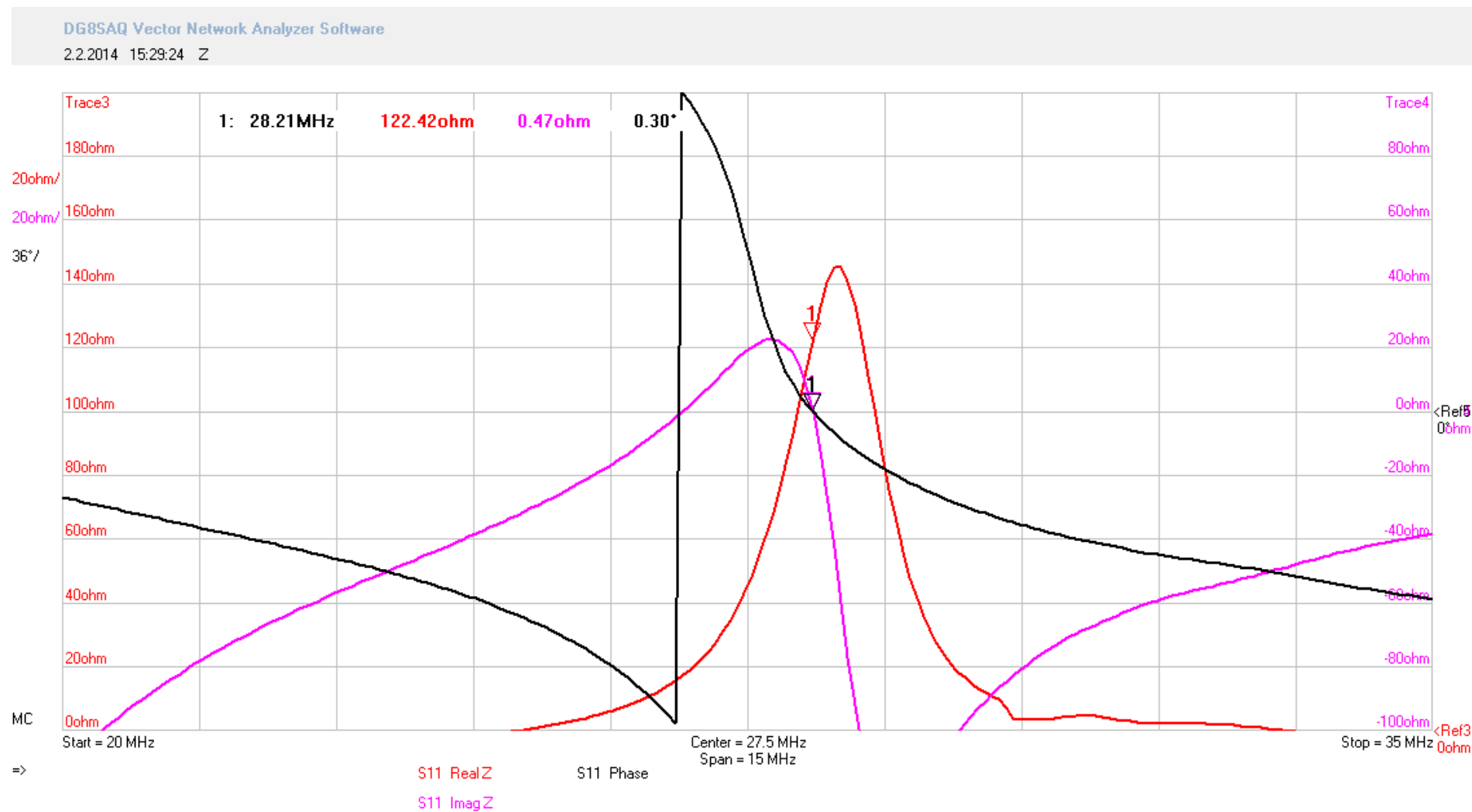




Příloha.O: Rozptylový parametr ( $s_{11}$ ) ploché MLA (VNWA)



Příloha.P: Charakter. reálné a imag. impedance a fáze rozptylového parametru (VNA)

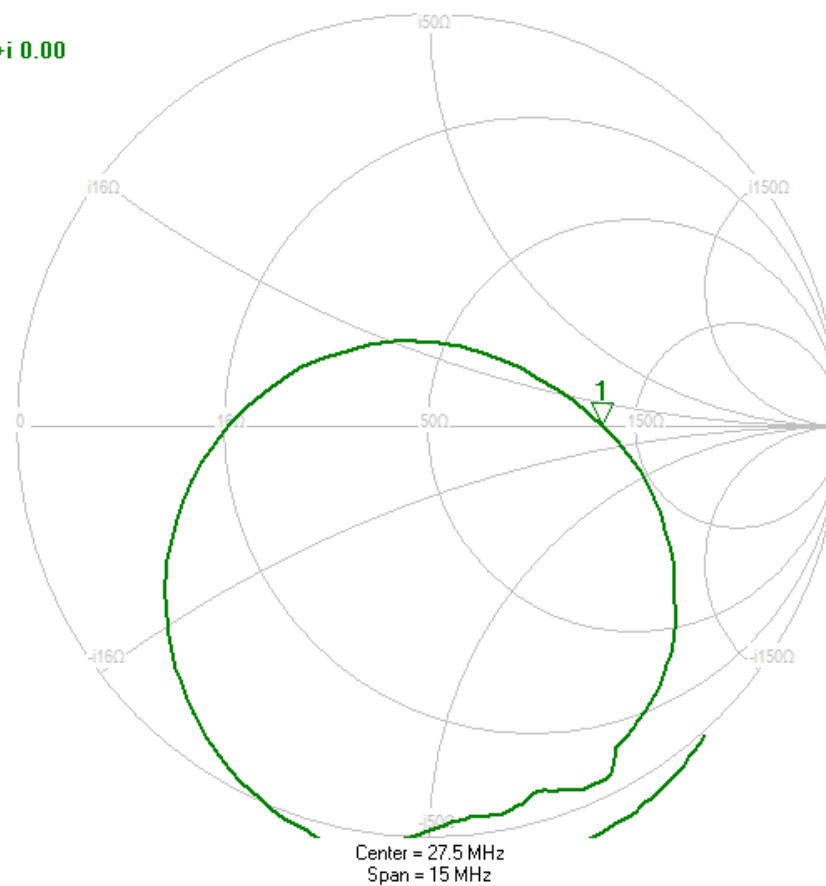


*Příloha.Q: Smithův diagram ploché MLA (VNWA)*

DG8SAQ Vector Network Analyzer Software

2.2.2014 15:27:58 smith

1: 28.21MHz 0.42+i 0.00

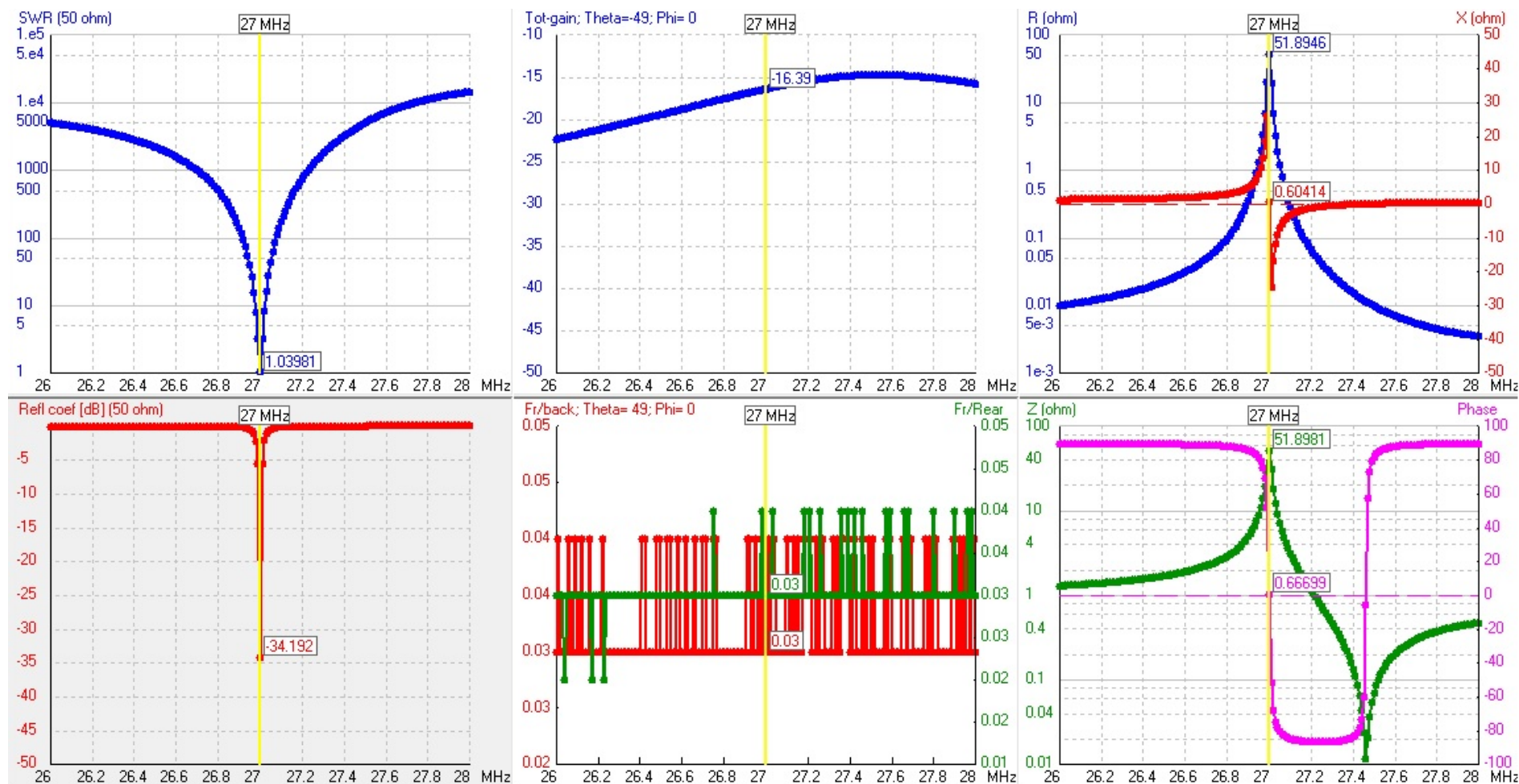


MC  
Start = 20 MHz  
=>

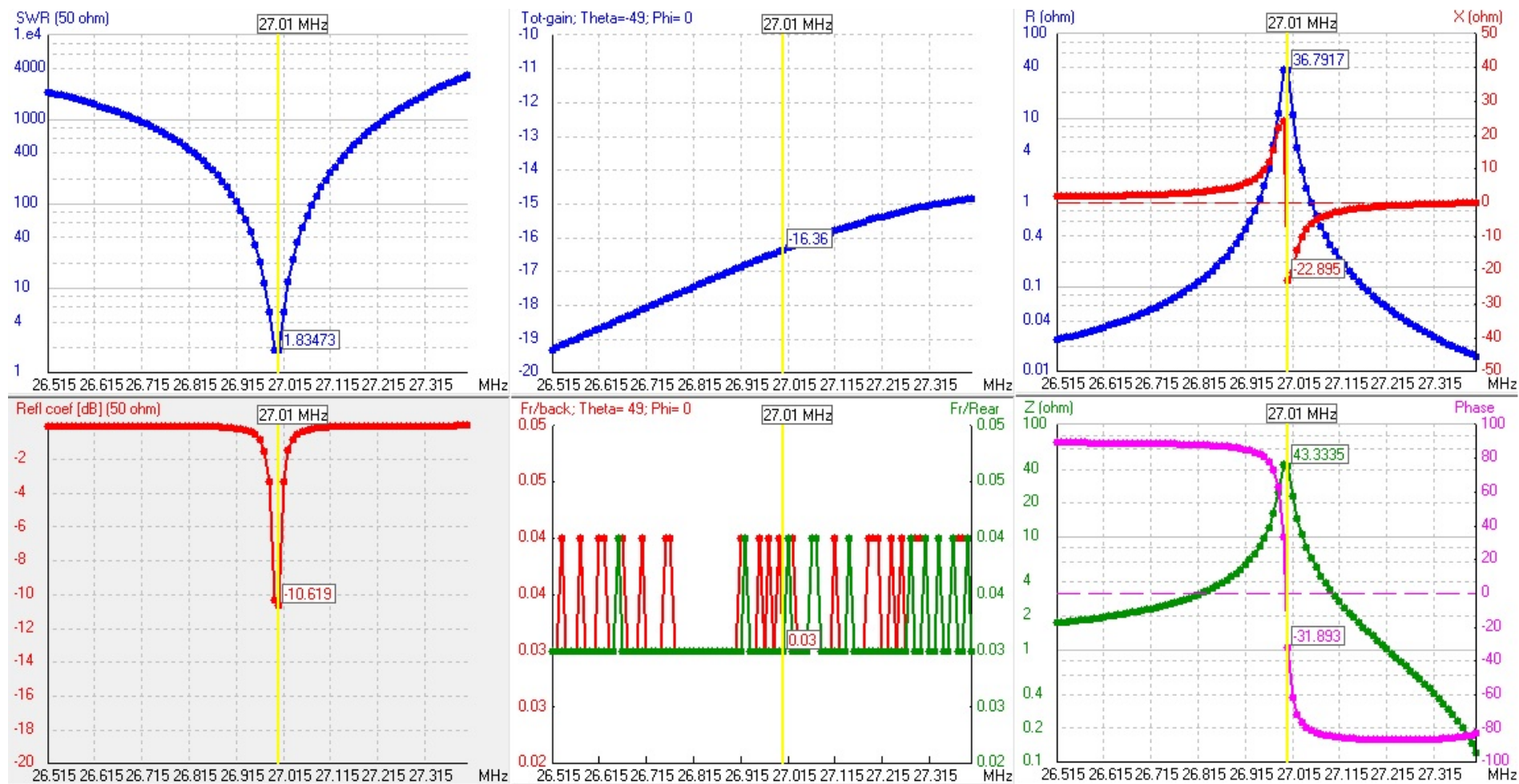
Stop = 35 MHz

S11 Smith

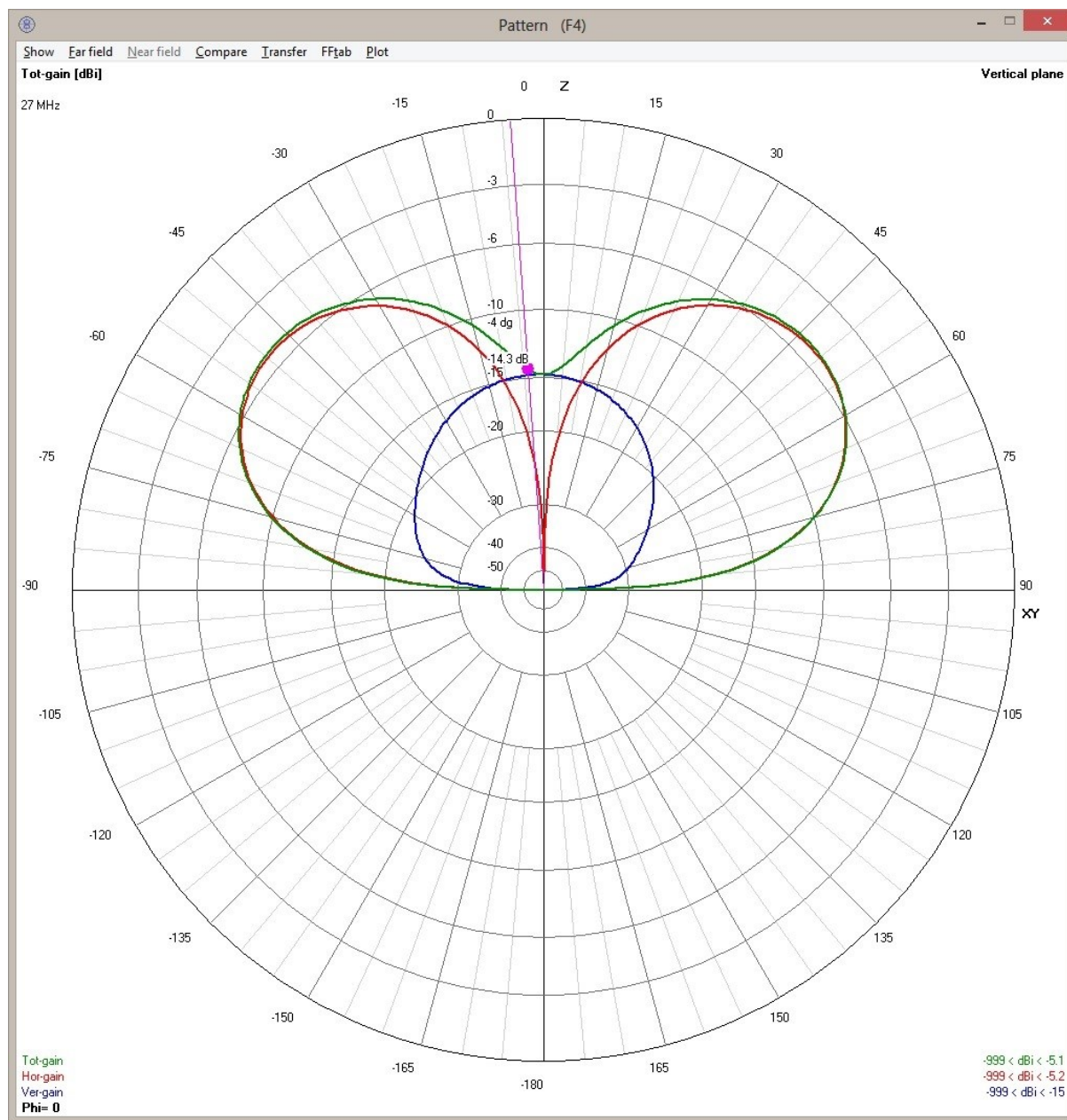
Příloha.R: Frekvenční analýza na pásmu 26 - 28 MHz

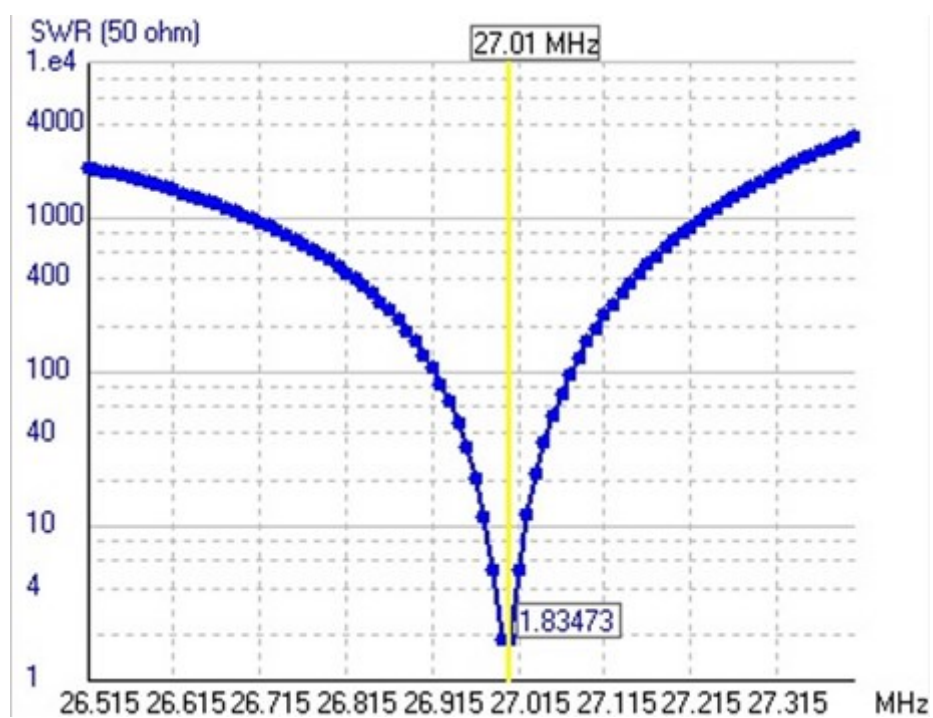


Příloha.S: Frekvenční analýza na CB pásmu



*Příloha.T: Vertikální charakteristika ploché MLA*







Příloha.V: Smithův diagram ploché MLA

